

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA:
INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIEROS MECÁNICOS

TEMA:
**ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA MECÁNICA EN PERNOS DE ANCLAJE
HASTA 1/2 PULGADA DE DIÁMETRO, UTILIZADOS EN ESTRUCTURAS
METÁLICAS**

AUTORES:
CRISTHIAN ANDRES GANSINO LLANOS
KEVIN ALEXANDER TAPIA MANTILLA

TUTOR:
WILLIAM GUSTAVO DÍAZ DÁVILA

Quito, marzo del 2021

Cesión de derechos de autor

Nosotros, Cristhian Andres Gansino Llanos con documento de identificación N° 1723368088 y Kevin Alexander Tapia Mantilla con documento de identificación N° 1500759111, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA MECÁNICA EN PERNOS DE ANCLAJE HASTA 1/2 PULGADA DE DIÁMETRO, UTILIZADOS EN ESTRUCTURAS METÁLICAS, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingenieros Mecánicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

.....
Cristhian Andres Gansino Llanos
C.I: 172336808-8

.....
Kevin Alexander Tapia Mantilla
C.I: 150075911-1

Quito, marzo de 2021

Declaratoria de coautoría del docente tutor

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Trabajo de Titulación, ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA MECÁNICA EN PERNOS DE ANCLAJE HASTA 1/2 PULGADA DE DIÁMETRO, UTILIZADOS EN ESTRUCTURAS METÁLICAS, realizado por Cristhian Andres Gansino Llanos y Kevin Alexander Tapia Mantilla, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, marzo del 2021



.....

William Gustavo Díaz Dávila

C.I. 0400926184

Dedicatoria

El presente proyecto técnico es dedicado a mis padres Antonieta y Ramiro, puesto que, gracias a sus enseñanzas, paciencia, su infinito amor y apoyo me han permitido culminar una meta de mucha importancia para mi vida personal y profesional. Es por estos motivos que expreso mi gratitud a mis queridos padres por ser esas personas que me brindaron mucha fortaleza para vencer cada obstáculo presentado en mi formación académica.

Así también dedico este trabajo a mi hermana Andrea y mis sobrinos Nathan, Amelia y Kelly por su apoyo moral lo cual fue esencial en el transcurso de mi carrera universitaria de esta manera me brindaron mucha paz, alegría y tranquilidad lo cual estabilizaba mi estado emocional permitiendo enfocarme al máximo en mis estudios.

Cristhian

Dedico este proyecto primeramente a Dios, por darme la vida y permitirme avanzar hasta un momento importante de mi formación profesional; a las personas más importantes en mi vida, mis abuelos por haber forjado a la persona que soy en la actualidad, mi madre por ser el detonante de mi inspiración y esfuerzo, mis tíos y tías que supieron apoyarme directa e indirectamente, a ellos debo todos mis logros incluyendo este, supieron motivarme constantemente para alcanzar mis sueños.

Kevin

Agradecimiento

De parte de Cristhian Andres Gansino Llanos y Kevin Alexander Tapia Mantilla agradecemos a la Universidad Politécnica Salesiana, por brindarnos un ambiente estable y cálido lo cual permitía que la formación académica sea agradable en el día a día. También agradecemos a cada uno de los docentes de alto nivel educativo los cuales nos guiaron por un camino ético y moral, además de impartir sus conocimientos de manera amable, didáctica y sobre todo muy profesional.

A nuestro tutor el Ing. William Díaz presentamos nuestro más sincero agradecimiento por su paciencia, dedicación y profesionalismo al momento de guiarnos en el transcurso de la elaboración de nuestro proyecto técnico siendo de vital importancia para lograr culminar satisfactoriamente la meta propuesta.

ÍNDICE

Cesión de derechos de autor.....	i
Declaratoria de coautoría del docente tutor	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimiento	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
SIMBOLOGÍA.....	xiii
GLOSARIO	xvi
RESUMEN.....	xviii
ABSTRACT.....	xix
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	3
MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Anclaje.....	3
1.2. Pernos de anclaje	4
1.3. Tipos de anclajes comerciales	6
1.4. Aplicaciones de los pernos de anclajes	8
1.5. Diámetro de anclaje	8
1.6. Selección de anclajes	9
1.7. Propiedades de los pernos de anclaje	9
1.8. Concentración de esfuerzos	10
1.9. Acumulación de esfuerzos en la rosca.....	11
1.10. Esfuerzo cortante en los filetes de una rosca	11
1.11. Proceso de fabricación del perno	11
1.12. Sujeción máquina de pruebas universal.....	12

1.13.	Factores que influyen en el desempeño de los anclajes.....	13
1.13.1.	Falla por fractura del acero	13
1.14.	Tratamientos superficiales	13
1.14.1.	Galvanizado en caliente	13
1.14.2.	Zincado.....	15
1.15.	Ensayo a tracción	17
1.16.	Máquina universal.....	21
1.17.	Varillas de construcción.....	22
1.18.	Materiales.....	22
1.19.	Adherencia entre perno y hormigón	23
CAPÍTULO II		24
PARÁMETROS DE EXPERIMENTACIÓN		24
2.1.	Longitud nominal de probetas roscadas para ensayo a tracción	26
2.2.	Definición de tamaño muestral.....	26
2.3.	Ensayos a tensión de los pernos de anclaje	32
CAPÍTULO III.....		34
RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN		34
3.1.	Resultados	34
3.1.1.	Perno mecanizado de 3/8 ” - 16 UNC.....	34
3.1.2.	Perno mecanizado galvanizado de 3/8 ” - 16 UNC.....	35
3.1.3.	Perno mecanizado de 1/2 ” - 13 UNC.....	37
3.1.4.	Perno laminado de 1/2 ” - 13 UNC	39
3.1.5.	Perno mecanizado galvanizado de 1/2 ” - 13 UNC.....	40
3.1.6.	Perno laminado galvanizado de 1/2 ” - 13 UNC.....	42
3.1.7.	Perno mecanizado M8.....	44
3.1.8.	Perno laminado M8	45
3.1.9.	Perno mecanizado galvanizado M8	47

3.1.10. Perno laminado galvanizado M8	48
3.1.11. Perno mecanizado M10	50
3.1.12. Perno laminado M10.....	51
3.1.13. Perno mecanizado galvanizado M10	53
3.1.14. Perno laminado galvanizado M10	55
3.2. Análisis de resultados	56
3.2.1. Análisis comparativo de probetas de 3/8 ” - 16 UNC.....	56
3.2.2. Análisis comparativo de probetas de 1/2 ” - 13 UNC.....	58
3.2.3. Análisis comparativo de probetas M8	59
3.2.4. Análisis comparativo de probetas M10	60
CAPÍTULO IV	64
ANÁLISIS DE COSTOS	64
4.1.1. Gastos de obtención de probetas.....	64
4.1.2. Gastos varios.....	67
CONCLUSIONES	70
RECOMENDACIONES	73
REFERENCIAS	74
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Normas equivalentes SAE, ASTM y métrico	9
Tabla 2. Especificaciones de las Normas SAE, ASTM y métrica para pernos de acero	10
Tabla 3. Aplicaciones de varillas corrugadas más utilizadas en la industria	22
Tabla 4. Propiedades mecánicas del Acero 4140 grado B7 según la Norma ASTM A193	24
Tabla 5. Propiedades Mecánicas de pernos milimétricos ISO 4017 (DIN 933)	25
Tabla 6. Propiedades mecánicas de varilla corrugada según la Norma ASTM A706	25
Tabla 7. Longitudes nominales para tornillos y espárragos	26
Tabla 8. Cantidad de probetas para ensayos a tensión	27
Tabla 9. Resultados de ensayo a tracción de pernos de 3/8 ” - 16 UNC mecanizados	35
Tabla 10. Resultados de ensayo a tracción de pernos mecanizados galvanizados de 3/8 ” - 16 UNC	37
Tabla 11. Resultados de ensayo a tracción de pernos mecanizados de 1/2 ” - 13 UNC	38
Tabla 12. Resultados de ensayo a tracción de pernos laminados de 1/2 ” - 13 UNC	40
Tabla 13. Resultados de ensayo a tracción de pernos mecanizados galvanizados de 1/2 ” - 13 UNC	42
Tabla 14. Resultados de ensayo a tracción de pernos laminados	43
Tabla 15. Resultados de ensayo a tracción de pernos mecanizados M8	45
Tabla 16. Resultados de ensayo a tracción de pernos laminados M8	46

Tabla 17. Resultados de ensayo a tracción de pernos M8 mecanizados galvanizados.....	48
Tabla 18. Resultados de ensayo a tracción de pernos M8 laminados galvanizados ..	49
Tabla 19. Resultados de ensayo a tracción de pernos M10 mecanizados.....	51
Tabla 20. Resultados de ensayo a tracción de pernos M10 laminados	53
Tabla 21. Resultados de ensayo a tracción de pernos M10 mecanizados galvanizados.....	54
Tabla 22. Resultados de ensayo a tracción de pernos M10 laminados galvanizados.	56
Tabla 23. Error porcentual de resistencia a la tracción	62
Tabla 24. Diferencia porcentual entre materia prima de probetas	63
Tabla 25. Gastos de materia prima y pernos laminados.....	64
Tabla 26. Gastos de fabricación de probetas y galvanizado	65
Tabla 27. Costo de utilización de laboratorio	67
Tabla 28. Gasto indirecto de tesisistas.....	68
Tabla 29. Costo de consumo energético	69
Tabla 30. Costo total de proyecto	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Partes de un anclaje	3
Figura 2. Pernos de anclaje Preinstalados	5
Figura 3. Anclajes post instalados, (a) Adhesivo, (b) sobre perforación en su base, (c1 y c2) expansivos y (d) expansivo con deslizamiento controlado	5
Figura 4. Anclajes químicos: (a) de inyección HY-200R, (b) anclaje adhesivo y varilla roscada HVA	6
Figura 5. Anclajes mecánicos: (a) Expansión para grandes cargas, (b) Expansión con diseño de cuñas, (c) De torque controlado	7
Figura 6. Anclajes mecánicos: (a) Wedge-All, (b) Sleeve-All, (c) Strong-Bolt 2	7
Figura 7. Aplicaciones: (a) Estructura, (b) Taludes	8
Figura 8. (a) Sistema de sujeción, (b) Accesorio de sujeción.	12
Figura 9. Falla por fractura del acero a tracción	13
Figura 10. Zona rica en Zn, (a) Diagrama de fases en equilibrio Zn-Fe y (b) Fases en capa de galvanizado	14
Figura 11. Arandela, tornillo y elementos de acople sometidos a proceso de zincado mecánico.	16
Figura 12. Zincado electrolítico con recubrimiento de cobre para una pieza de latón.	17
Figura 13. Perno de anclaje para ensayo a tracción	17
Figura 14. Curva esfuerzo – deformación.....	18
Figura 15. Diagrama esfuerzo deformación de materiales dúctiles en tensión.....	19
Figura 16. Probeta estándar para ensayo a tracción	20
Figura 17. Máquina universal de ensayo a tracción.....	21
Figura 18. Probetas galvanizadas, mecanizadas y prefabricadas de 1/2 ” – 13 UNC.	28

Figura 19. Dimensiones de probetas de ensayo a tracción, (a) 1/2 " – 13 UNC y (b) 3/8 " – 16 UNC.	29
Figura 20. Dimensiones de probetas de ensayo a tracción, (a) M10 y (b) M8.	29
Figura 21. Probetas M10 mecanizadas galvanizadas.	30
Figura 23. Máquina universal TestResources.	31
Figura 24. Flujograma de proceso de ensayo a tensión.	32
Figura 25. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno de 3/8"-16UNC mecanizado.....	34
Figura 26. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno de 3/8"-16 UNC mecanizado galvanizado.	36
Figura 27. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno de 1/2"-13 UNC mecanizado.....	38
Figura 28. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno de 1/2"-13 UNC laminado.	39
Figura 29. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno de 1/2 " – 13 UNC mecanizado galvanizado.	41
Figura 30. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno de 1/2 " – 13 UNC laminado galvanizado.	43
Figura 31. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno M8 mecanizado.....	44
Figura 32. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno M8 laminado.	46
Figura 33. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno M8 mecanizado galvanizado.	47
Figura 34. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno M8 laminado galvanizado.	49
Figura 35. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno M10 mecanizado.....	50

Figura 36. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno M10 laminado.....	52
Figura 37. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno M10 mecanizado galvanizado.	54
Figura 38. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno M10 laminado galvanizado.	55
Figura 39. Diagrama esfuerzo vs deformación de pernos mecanizados galvanizados y sin galvanizar de 3/8 ”.....	57
Figura 40. Diagrama esfuerzo vs deformación de pernos mecanizados y laminados galvanizados y sin galvanizar de 1/2 ”.....	58
Figura 41. Diagrama esfuerzo vs deformación de pernos mecanizados y laminados galvanizados y sin galvanizar de M8.	60
Figura 42. Diagrama esfuerzo vs deformación de pernos mecanizados y laminados galvanizados y sin galvanizar de M10.	61

SIMBOLOGÍA

P1UNC 1 – 2 S: Prueba 1 para perno sin mecanizar o laminado de 1/2 pulgada de paso grueso.

P2UNC 1 – 2 S: Prueba 2 para perno sin mecanizar de 1/2 pulgada de paso grueso.

P1UNC 1 – 2 M: Prueba 1 para perno mecanizado de 1/2 pulgada de paso grueso.

P2UNC 1 – 2 M: Prueba 2 para perno mecanizado de 1/2 pulgada de paso grueso.

P1UNC 1 – 2 S – G: Prueba 1 para perno sin mecanizar galvanizado de 1/2 pulgada de paso grueso.

P2UNC 1 – 2 S – G: Prueba 2 para perno sin mecanizar galvanizado de 1/2 pulgada de paso grueso.

P1UNC 1 – 2 M – G: Prueba 1 para perno mecanizado galvanizado de 1/2 pulgada de paso grueso.

P2UNC 1 – 2 M – G: Prueba 2 para perno mecanizado galvanizado de 1/2 pulgada de paso grueso.

P1UNC 3 – 8 M – G: Prueba 1 para perno mecanizado galvanizado de 3/8 pulgada de paso grueso.

P2UNC 3 – 8 M – G: Prueba 2 para perno mecanizado galvanizado de 3/8 pulgada de paso grueso.

P1UNC 3 – 8 M: Prueba 1 para perno mecanizado de 3/8 pulgada de paso grueso.

P2UNC 3 – 8 M: Prueba 2 para perno mecanizado de 3/8 pulgada de paso grueso.

P1M8S – G: Prueba 1 para perno sin mecanizar galvanizado de 8 mm de diámetro.

P2M8S – G: Prueba 2 para perno sin mecanizar galvanizado de 8 mm de diámetro.

P1M8M – G: Prueba 1 para perno mecanizado galvanizado de 8 mm de diámetro.

P2M8M – G: Prueba 2 para perno mecanizado galvanizado de 8 mm de diámetro.

P1M8M: Prueba 1 para perno mecanizado de 8 mm de diámetro.

P2M8M: Prueba 2 para perno mecanizado de 8 mm de diámetro.

P1M8S: Prueba 1 para perno sin mecanizar de 8 mm de diámetro.

P2M8S: Prueba 2 para perno sin mecanizar de 8 mm de diámetro.

P1M10S – G: Prueba 1 para perno sin mecanizar galvanizado de 10 mm de diámetro.

P2M10S – G: Prueba 2 para perno sin mecanizar galvanizado de 10 mm de diámetro.

P1M10M – G: Prueba 1 para perno mecanizado galvanizado de 10 mm de diámetro.

P2M10M – G: Prueba 2 para perno mecanizado galvanizado de 10 mm de diámetro.

PM10: Perno de anclaje M10

P1M10S: Prueba 1 para perno sin mecanizar de 10 mm de diámetro.

P2M10S: Prueba 2 para perno sin mecanizar de 10 mm de diámetro.

P1M10M: Prueba 1 para perno mecanizado de 10 mm de diámetro.

P2M10M: Prueba 2 para perno mecanizado de 10 mm de diámetro.

” : Pulgada

M8S8: Ensayo 8 de probeta sin mecanizar de 8 mm de diámetro.

M8S2: Ensayo 2 de probeta sin mecanizar de 8 mm de diámetro.

M8M8: Ensayo 8 de probeta mecanizada de 8 mm de diámetro.

M8M5: Ensayo 5 de probeta mecanizada de 8 mm de diámetro.

M10M8: Ensayo 8 de probeta mecanizada de 10 mm de diámetro.

M10M4: Ensayo 4 de probeta mecanizada de 10 mm de diámetro.

M10S1: Ensayo 1 de probeta mecanizada de 10 mm de diámetro.

M10S6: Ensayo 6 de probeta mecanizada de 10 mm de diámetro.

PM10_3: Perno 3 de 10 mm de diámetro para calibración.

PM10_2: Perno 2 de 10 mm de diámetro para calibración.

3/8M8: Ensayo 8 de probeta mecanizada de 3/8 ” de diámetro.

3/8M7: Ensayo 7 de probeta mecanizada de 3/8 ” de diámetro.

1/2M3: Ensayo 3 de probeta mecanizada de 1/2 ” de diámetro.

1/2M2: Ensayo 2 de probeta mecanizada de 1/2 ” de diámetro.

1/2S1: Ensayo 1 de probeta sin mecanizar de 1/2 ” de diámetro.

1/2S2: Ensayo 2 de probeta sin mecanizar de 1/2 " de diámetro.

3/8MG6: Ensayo 6 de probeta mecanizada galvanizada de 3/8 "de diámetro.

3/8MG8: Ensayo 8 de probeta mecanizada galvanizada de 3/8 "de diámetro.

M8MG7: Ensayo 7 de probeta mecanizada galvanizada de 8 mm de diámetro.

M8MG6: Ensayo 6 de probeta mecanizada galvanizada de 8 mm de diámetro.

M8SG3: Ensayo 3 de probeta sin mecanizar galvanizada de 8 mm de diámetro.

M8SG2: Ensayo 2 de probeta sin mecanizar galvanizada de 8 mm de diámetro.

M10MG8: Ensayo 8 de probeta mecanizada galvanizada de 10 mm de diámetro.

M10MG7: Ensayo 7 de probeta mecanizada galvanizada de 10 mm de diámetro.

M10SG7: Ensayo 7 de probeta sin mecanizar galvanizada de 10 mm de diámetro.

M10SG8: Ensayo 8 de probeta sin mecanizar galvanizada de 10 mm de diámetro.

1/2M8: Ensayo 8 de probeta mecanizada de 1/2 " de diámetro.

1/2M7: Ensayo 7 de probeta mecanizada de 1/2 " de diámetro.

1/2MG8: Ensayo 8 de probeta mecanizada galvanizada de 1/2 " de diámetro.

1/2MG7: Ensayo 7 de probeta mecanizada galvanizada de 1/2 " de diámetro.

1/2SG8: Ensayo 8 de probeta sin mecanizar galvanizada de 1/2 " de diámetro.

1/2SG7: Ensayo 7 de probeta sin mecanizar galvanizada de 1/2 " de diámetro.

1/2MG1: Ensayo 1 de probeta mecanizada galvanizada de 1/2 " de diámetro.

1/2MG2: Ensayo 2 de probeta mecanizada galvanizada de 1/2 " de diámetro.

N: Newton.

MPa: Mega Pascales.

mm: Milímetros.

GLOSARIO

- **Anclaje:** Los anclajes son dispositivos constituidos por tirantes o por barras rígidas que integradas en un talud de roca o en ciertas partes de una obra como muros, zapatas entre otros, debido a su trabajo a tracción, aumenta la resistencia y estabilidad [1].
- **Mecanizado:** Por lo general, el mecanizado se define como un proceso de fabricación mecánica de piezas, realizado mediante un proceso de conformado del material [2].
- **Galvanizado:** Proceso de protección contra la corrosión para el acero o el hierro, en el cual se produce una unión metalúrgica entre la superficie del material y el recubrimiento de zinc para evitar su oxidación [3].
- **Zincado:** Proceso que consiste en la aplicación de pintura de polvo de zinc y resinas especiales mediante pistola, brocha o rodillo, sobre la superficie de acero para evitar la corrosión [4].
- **Pernos autoperforantes:** Por definición se refiere a un tipo de perno que a medida que avanza, crea su propio orificio, utilizado comúnmente para fijaciones de metal y madera. Siendo su principal característica evitar la perforación inicial para el ensamble en estructuras, proporcionando mayor precisión en la unión de piezas [5].
- **Autorroscante:** Se define como la capacidad de avanzar a medida que se hace girar un perno o tornillo, creando al mismo tiempo su propia rosca. Esta propiedad física en ocasiones es posible debido a un vacío en la continuidad de rosca del elemento [6].
- **Estricción:** La estricción genera la reducción de área de la sección tras ser sometido a un esfuerzo a tensión, también es la responsable del descenso de la curva esfuerzo-deformación [7].

- **Servocontrol:** considerado como el cerebro del sistema del servomotor, es un mecanismo auxiliar que multiplica automáticamente y con exactitud el esfuerzo realizado por una máquina [8].
- **Microaleado:** El microaleado del acero es el refinamiento de grano mediante el condicionamiento de la austenita con métodos de laminación con enfriamiento controlado [9].
- **Inyección:** La inyección es una técnica que consiste en inyectar una pasta de baja viscosidad denominada lechada [10].
- **Aleación:** No es más que la mezcla homogénea de dos o más elementos, siendo al menos uno de ellos un metal [11].
- **Bulbo:** Se refiere al material como cemento, mortero o resina que encapsula o al perno de anclaje lo cual produce una transferencia de cargas por adherencia y fricción desde el pilar hacia la superficie que lo rodea [12].

RESUMEN

En la presente investigación se realizó un análisis de la resistencia mecánica en pernos de anclaje hasta 1/2 pulgada de diámetro, utilizados en estructuras metálicas. Para realizar este tipo de estudio se utilizó una máquina universal de la marca TestResources donde se efectuaron 8 ensayos a tracción en cada probeta milimétrica M8, M10 y probeta de 1/2 y 3/8 de pulgadas de diámetro, con un total de 112 pruebas al aplicar 4 variantes en cada clase de perno. La primera variación es un perno mecanizado por arranque de viruta a partir de varilla corrugada de 14 mm de diámetro, el segundo cambio en el perno mecanizado se refiere a la aplicación de un proceso de galvanizado tropicalizado, la tercer variante es un perno laminado adquirido en Castillo Hermanos – Sede Guajaló y la última variedad se encuentra en el perno laminado galvanizado, estas variaciones se ejecutaron en todos los pernos a excepción del perno de 3/8 ” debido a que en el mercado actual no existe este tipo de perno en rosca completa. De este modo se logró determinar qué los pernos de 3/8 ” mecanizado sin recubrimiento, 1/2” laminado galvanizado, M8 laminado galvanizado y M10 laminado galvanizado son los más adecuados para ser utilizados en estructuras metálicas debido a que poseen valores máximos de carga máxima de 32822.66, 82796.92, 34133.06, 57344.17 N, resistencia máxima a la tracción de 496.26, 674.69, 722.06, 730.13 MPa y límite elástico de 271.56, 514.26, 600.43, 633.96 MPa en cada caso.

Palabras claves: análisis, resistencia, pernos, anclaje, estructuras metálicas.

ABSTRACT

In the present investigation, an analysis of the mechanical resistance was carried out in anchor bolts up to 1/2 inch in diameter, used in metallic structures. To carry out this type of study, a universal machine of the TestResources brand was used where 8 tensile tests were carried out on each millimeter specimen M8, M10 and specimen 1/2 and 3/8 inches in diameter, with a total of 112 tests by applying 4 variants in each kind of bolt. The first variation is a bolt machined by chip removal from 14 mm diameter rebar, the second change in the machined bolt refers to the application of a tropicalized galvanizing process, the third variant is a rolled bolt purchased in Castillo Hermanos - Sede Guajaló and the last variety is found in the galvanized rolled bolt, these variations were made on all bolts except for the 3/8 " bolt, since this type of bolt with full thread does not exist in the current market. In this way, it was possible to determine which bolts of 3/8 " machined without coating, 1/2" rolled galvanized, M8 rolled galvanized and M10 rolled galvanized are the most suitable to be used in metal structures due to their maximum load values maximum of 32822.66, 82796.92, 34133.06, 57344.17 N, maximum tensile strength of 496.26, 674.69, 722.06, 730.13 MPa and elastic limit of 271.56, 514.26, 600.43, 633.96 MPa in each case.

Keywords: analysis, resistance, bolts, anchoring, metallic structures.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad las estructuras metálicas forman gran parte del sector de la construcción por varios factores de alto beneficio para la industria, tres de los más relevantes se refieren al ahorro de tiempo al momento de construir, a una larga vida útil en la estructura, además de adaptarse en cualquier tipo de suelo. En una edificación estructural es necesario proporcionar estabilidad y transferencia de cargas verticales y horizontales desde el cuerpo de la estructura hacia la base, para lograr este propósito se utilizan los pernos de anclaje.

Actualmente existen una variedad de anclajes los cuales ofrecen diferentes propiedades mecánicas según la aplicación requerida, es por este motivo que el presente estudio compara varias probetas de anclaje de diferente material y tipo de fabricación.

El presente estudio se encuentra estructurado por diferentes etapas necesarias para cumplir con los objetivos planteados, en el primer capítulo, se utiliza una revisión literaria enfocada en los pernos de anclaje, las diversas presentaciones que existen en el mercado industrial, sus aplicaciones, tratamientos superficiales, fallas, proceso de fabricación, ensayo a tracción y tipos de adherencia. En el segundo capítulo se ejecutará el método de campo mediante el cual se obtendrá las propiedades de los materiales, el tamaño muestral apropiado para validar los resultados de los ensayos a tracción, características de la máquina universal de la Universidad Politécnica Salesiana, proceso para ensayos a tensión, diseño y proceso de fabricación de probetas.

Para el capítulo 3 se utilizan dos tipos de métodos tabular y gráfico los cuales mostrarán los resultados de mayor relevancia proporcionados a partir de varios ensayos, lo cual permitirá realizar un análisis enfocado en el discernimiento de las probetas en base a las propiedades mecánicas de mayor confiabilidad, de este modo se obtendrá los pernos más adecuados para estructuras metálicas. En el último capítulo se detallará los diversos gastos realizados con la finalidad de cumplir con los objetivos de la investigación además permitirá establecer indicadores en relación de costo – beneficio de cada tipo de probeta para obtener un análisis comparativo que permita identificar a la probeta más adecuada para estructuras metálicas.

En la actualidad la industria metalmecánica no ha profundizado en estudios enfocados en el análisis de la resistencia mecánica de los pernos de anclaje para estructuras metálicas, muchas veces los constructores no calificados utilizan estos elementos de forma empírica, sin tomar en cuenta sus procesos de fabricación, siendo una de las principales razones los problemas de corrosión que generan más costos de mantenimiento y la reducción en la vida útil de los pernos de anclaje, motivo por el cual se ha visto la necesidad de realizar una investigación teórica y experimental para comprender las propiedades mecánicas y utilizar apropiadamente los pernos de anclaje.

En el presente muchas obras civiles se realizan en combinación con estructuras metálicas, generando una gran demanda en la utilización de pernos de anclajes, para lo cual es necesario informarse sobre qué características son relevantes al utilizar los pernos. Para mantener estas características también se requieren recubrimientos que prolonguen la vida útil de los pernos de anclaje, debido a que se encuentran expuestos a condiciones atmosféricas adversas.

El objetivo general consiste en analizar la resistencia mecánica en pernos de anclaje hasta 1/2 pulgada de diámetro, utilizados en estructuras metálicas.

Los objetivos específicos son:

- Estudiar la situación actual de la disponibilidad de pernos de anclaje en el mercado y su utilización en las construcciones mecánicas.
- Analizar las propiedades mecánicas de los pernos de anclaje obtenidos por procesos de mecanizado y laminado.
- Evaluar la resistencia mecánica de los pernos de anclaje por efecto del galvanizado en caliente.
- Comparar los resultados obtenidos en los ensayos a tensión de las alternativas seleccionadas para los pernos de anclaje.
- Establecer indicadores financieros mediante el análisis costo - beneficio de los procesos de laminado, mecanizado y galvanizado en caliente de los pernos de anclaje utilizados en estructuras metálicas.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Anclaje

El término general anclaje se define como un conjunto de elementos destinados a fijar un objeto mecánico firmemente al suelo, de manera que se transmitan los esfuerzos entre dos puntos tanto en la superficie del terreno como la parte interna del mismo [13]. Una falla en el anclaje presenta pérdidas económicas y en ocasiones eventos que atentan con la vida humana [14].

Según Di Gregorio et al. [15] la aplicación de un anclaje permite una mejor respuesta en la retención de estructuras construidas en pendientes inestables, logrando aumentar el factor de seguridad. La tracción influida en la tierra depende de la naturaleza del suelo, inyección de lechada y la tensión aplicada alrededor del bulbo. Un anclaje está integrado por dos elementos como se aprecia en la Figura 1, un tendón de acero que se desplaza a través del suelo o muro, y en el punto final del mismo cuenta con un bulbo el cual se encarga de transmitir las cargas generadas por las presiones de la tierra sobre los elementos estructurales.

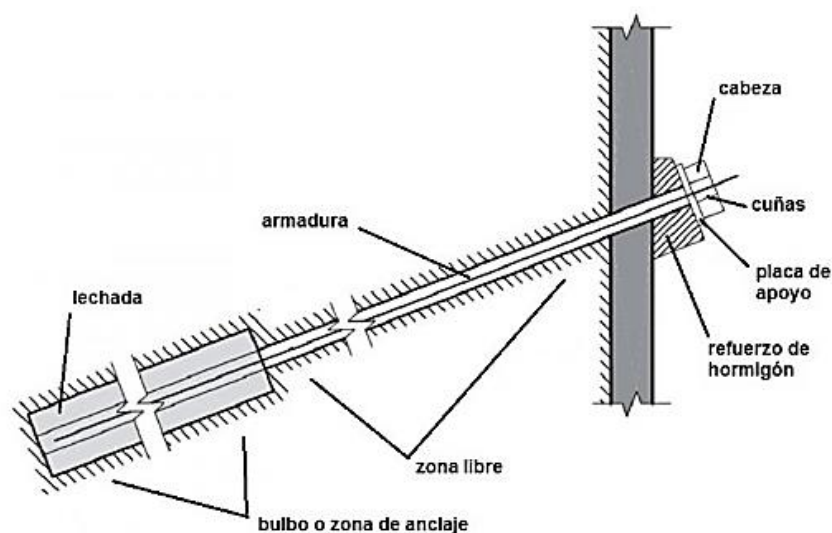


Figura 1. Partes de un anclaje [16]

El dispositivo de anclaje está compuesto comúnmente de un perno encargado de sostener y transmitir las cargas de tensión de la estructura al suelo, también de una

cuña para un mejor apriete o ajuste entre los elementos, una placa de apoyo la cual evita desplazamientos innecesarios de la estructura acoplada, se incluye un refuerzo entre la cabeza del perno y la estructura netamente de hormigón. La armadura del perno al estar anclada al suelo se divide en dos secciones una longitud libre que se encuentra entre la cabeza y la parte extrema del bulbo, y una longitud fija o zona de anclaje donde se aplica la lechada de manera que se mantiene fijo el perno y permite transmitir la carga al suelo [17].

De acuerdo con el trabajo aplicado en estructuras metálicas existen elementos que se encuentran pretensados una vez que han sido instalados para agregar una carga Normal a la superficie de apoyo denominados anclajes activos. En la investigación realizada por Lopez [18] este tipo de anclaje puede intervenir en diferentes fases de un proyecto, como las soluciones de remediación en obras civiles que se generan por los problemas de deslizamiento del suelo. También existen elementos conocidos como anclajes pasivos que al no ser pretensados realizarán su función al existir movimiento en la tierra [19].

1.2. Pernos de anclaje

El perno se conoce como una barra de acero, que al sumergirse en lechada de cemento o al anclarse a un elemento endurecido transmite diferentes fuerzas aplicadas al sujetar la superficie, al reunir estas características se lo denomina perno de anclaje. Este elemento también puede ser considerado como sostenimiento metálico temporal, y su trabajo se realiza por la resistencia mecánica al desplazamiento en toda su longitud [20].

Si el perno de anclaje es colocado antes de realizar el vaciado del concreto se lo conoce como un anclaje preinstalado, dentro de los pernos de anclaje preinstalados se toma en cuenta a los pernos de cabeza hexagonal, tornillos con extremo en forma de gancho sea en L o J los cuales incluyen una arandela para su ajuste y los pernos con cabeza soldada como se aprecian en la Figura 2 [21].

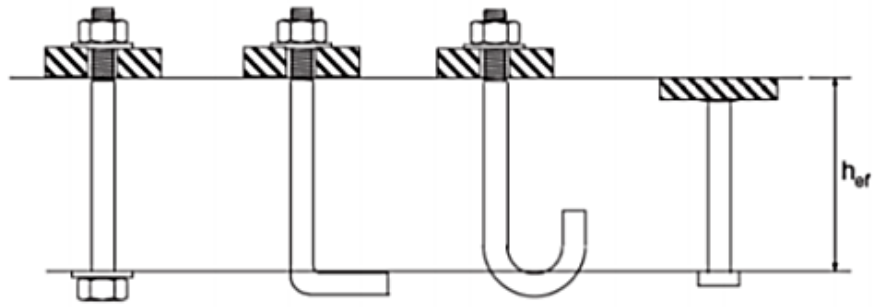


Figura 2. Pernos de anclaje Preinstalados [21]

El anclaje al encontrarse preparado antes del vaciado del concreto genera ventajas en la variedad de formas y dimensiones, así como la precisión en las barras de acero de refuerzo. Existen dos desventajas características de un perno preinstalado como el cambio en la posición durante el llenado de concreto y la dificultad para corregir la posición del elemento una vez que el concreto se ha secado.

Un perno de anclaje instalado en el concreto endurecido se lo denomina anclaje post instalado, en la Figura 3 se observa diferentes tipos de anclajes posinstalados. En la Figura 3 (a) se aprecia un anclaje adhesivo utilizado para refuerzo estructural, el cual requiere de una resina epóxica para sujetar el elemento al concreto, el anclaje con sobre perforación en su base ubicado en la Figura 3 (b) excede el límite del concreto para fijar la estructura. Finalmente, la Figura 3 (c1, c2 y d) representan anclajes expansivos diseñados para insertarse en orificios preperforados de manera que puedan expandirse ajustando una tuerca, de tal forma que transfiera la carga a tracción desde el bulón al concreto, cabe recalcar que el anclaje de la Figura 3 (d) permite al operario controlar la expansión del elemento de sujeción [22].

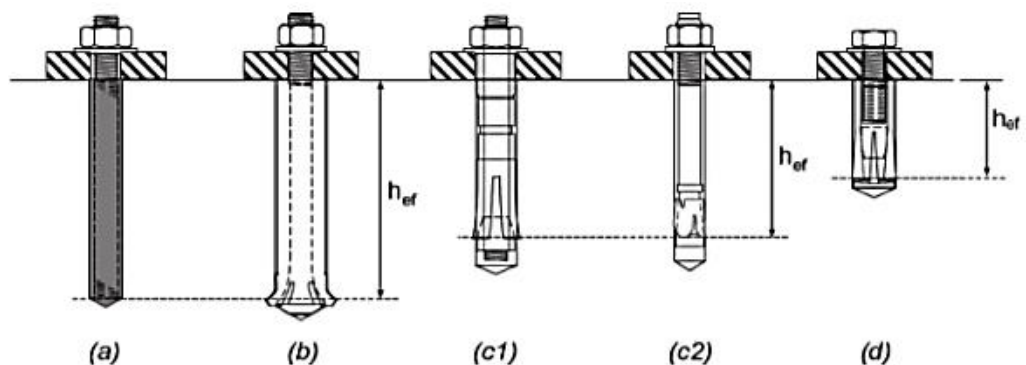


Figura 3. Anclajes post instalados, (a) Adhesivo, (b) sobre perforación en su base, (c1 y c2) expansivos y (d) expansivo con deslizamiento controlado [22]

Los anclajes post instalados transmiten la carga hacía el concreto a través de la fricción entre el anclaje y los bordes del agujero taladrados previamente [23]. Ruda [24] concluye que el aumento de resistencia de un sistema de anclaje post instalado depende de la calidad del concreto. La precisión respecto a los componentes sin la necesidad de una perforación del encofrado es una de sus ventajas, en cuanto a la desventaja que presenta es la imprecisión en la ubicación del anclaje con respecto al acero de refuerzo.

1.3. Tipos de anclajes comerciales

El mercado ofrece gran variedad de sistemas de anclajes entre ellos se encuentran los anclajes químicos, tales como, el sistema de inyección HY-200R como se aprecia en la Figura 4 (a) el cual es un anclaje donde el perno va acompañado de conglomerantes y aditivos que le proporciona una máxima capacidad de carga, seguridad y productividad, usados en conexiones estructurales, muros de contención, fijación de equipos entre otros. También, brinda un sistema de anclaje adhesivo como se observa en la Figura 4 (b), compuesto por dos elementos, una capsula adhesiva y varilla roscada, favorables en conexiones de acero - hormigón, fijación de maquinaria pesada, soporte de cintas transportadoras entre otras [25].



Figura 4. Anclajes químicos: (a) de inyección HY-200R, (b) anclaje adhesivo y varilla roscada HVA [25]

Además de los anclajes químicos, el mercado actual ofrece una variedad de anclajes mecánicos. La Figura 5 (a) muestra un anclaje de expansión para grandes cargas HSL - 3 donde su camisa exterior provee una mayor capacidad al corte y puede ser reajustado en cualquier instante, son aplicables para fijación de estructuras, soportes, maquinarias entre otros, el anclaje de expansión como se aprecia en la Figura 5 (b),

tiene un diseño único de cuñas (Kwik Bolt 3), para instalaciones en agujeros sin fondo, útiles en la colocación de tuberías, fijación de estructuras metálicas entre otras y finalmente el anclaje mecánico de torque controlado HSV de la Figura 5 (c), recomendado para cargas estáticas, excelente para fijaciones en serie y de gran volumen, tales como soportes, tableros eléctricos, escaleras y barreras [25].

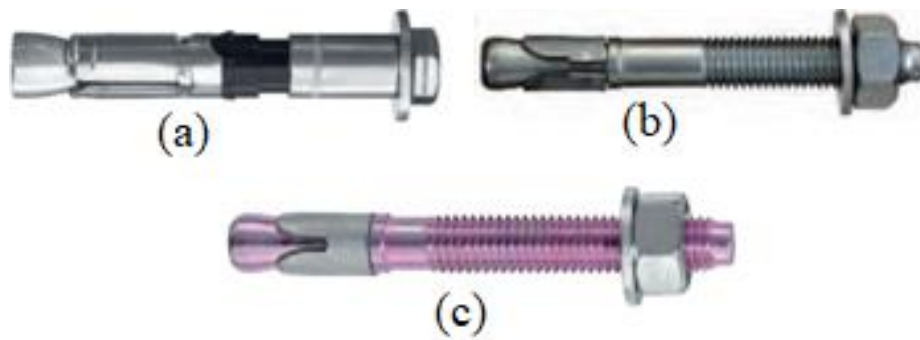


Figura 5. Anclajes mecánicos: (a) Expansión para grandes cargas, (b) Expansión con diseño de cuñas, (c) De torque controlado [25]

El mercado industrial ofrece anclajes mecánicos como se muestra en la Figura 6. La sección (a) muestra el anclaje de expansión estilo cuña sin portante de fondo (Wedge - All) utilizado en concreto sólido o mampostería de mortero, en la sección (b) se observa el anclaje de manga (Sleeve - All) de expansión preensamblados aplicables en todo tipo de materiales de base sólida, disponible en estilo de cabeza avellanada, hexagonal, con acople de varilla plana o redonda. Finalmente, el anclaje tipo cuña (Strong - Bolt 2) de la Figura 6 (c) está diseñado para un óptimo desempeño en concreto con y sin fisuras, así como en mampostería sin grietas [26].



Figura 6. Anclajes mecánicos: (a) Wedge - All, (b) Sleeve - All, (c) Strong - Bolt 2 [26]

1.4. Aplicaciones de los pernos de anclajes

Los anclajes son utilizados en distintas situaciones que requieren de conexiones entre el suelo y un elemento de fijación para soportar un estado de esfuerzos, mejorando la estabilidad y vida útil de estructuras. Según Cruz et al. [27] los pernos son necesarios para el soporte de taludes en una excavación y casos en donde se requiere estabilizar la masa del suelo en un muro de tierra para evitar el colapso al disminuir la resistencia al corte de la masa del suelo, comúnmente en estos casos para evitar el colapso se usan anclajes post instalados como los de inyección. Otras aplicaciones de los anclajes son la fijación de máquinas herramientas y estructuras metálicas.

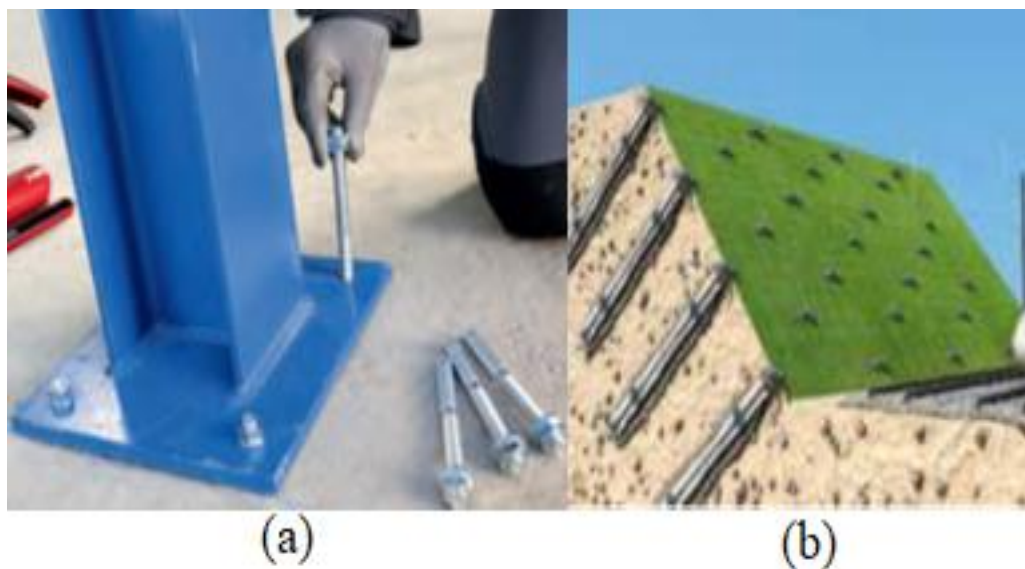


Figura 7. Aplicaciones: (a) Estructura, (b) Taludes [28]

La Figura 7 muestra dos aplicaciones de pernos de anclaje posinstalados, el ítem (a) se refiere a la fijación de una estructura metálica mediante un sistema de anclaje de tipo adhesivo con perno, mientras que en la Figura 7 (b) se aprecia pernos de anclaje de expansión para realizar un soporte en taludes con ayuda de la lechada de cemento.

1.5. Diámetro de anclaje

Wang et al. [29] elaboraron 48 pruebas de tracción con anclajes de diferentes diámetros concluyendo que su capacidad de tracción se encuentra relacionada con el diámetro de la barra, profundidad de empotramiento y el tipo de adhesivo, a mayor diámetro y profundidad de embebido se incrementa la carga efectiva de fricción entre los materiales debido a una mayor área de contacto. Ramírez [30] realiza ensayos a

tensión, donde los anclajes de menor diámetro y longitud presentan mayor variación entre resultados experimentales y teóricos, mientras que en los diámetros y longitudes de mayor proporción la variación es menor.

1.6. Selección de anclajes

Para la selección de anclajes se debe tener en cuenta diferentes consideraciones, sean cargas aplicadas o sollicitaciones. En situaciones en la que la transferencia de carga es importante se toma en cuenta la capacidad de carga, el tipo de carga sea estática o dinámica, el material al cual se fija el anclaje, espacio para el anclaje y distancia del borde, condiciones del entorno como humedad o presencia de agentes químicos, además se incluye la seguridad y el cuidado del medio ambiente [31].

1.7. Propiedades de los pernos de anclaje

La Norma ASTM F1554 abarca el tema de los pernos de anclaje destinados a sujetar los soportes estructurales a cimientos de hormigón. Los requisitos químicos, las propiedades mecánicas y las tolerancias dimensionales están cubiertos por la especificación F1554.

Tabla 1. Normas equivalentes SAE, ASTM y métrico [32], [33]

GRADO SAE	GRADO ASTM	GRADO MÉTRICO
J-429 Grado 5	A449	8.8
Acero medio carbono templado y revenido		

En la Tabla 1 se aprecia la equivalencia entre los grados SAE, ASTM y métricos, de aceros medio carbono templado y revenido para tornillos y la Tabla 2 detalla las propiedades mecánicas de las diferentes Normas equivalentes, en un rango de diámetros aceptados por cada Norma.

Tabla 2. Especificaciones de las Normas SAE, ASTM y métrica para pernos de acero [34]

Intervalo de diámetros, plg	Resistencia de prueba mínima, kpsi	Resistencia mínima a la tensión, kpsi	Resistencia mínima a la fluencia, kpsi
SAE Grado 5 para pernos de acero			
¼ a 1	85	120	92
1 1/8 a 1 ½	74	105	81
ASTM 449 para pernos de acero			
¼ a 1	85	120	92
1 1/8 a 1 ½	74	105	81
1 ¾ a 3	55	90	58
Clase métrica 8.8 para pernos, tornillos y birlos de acero			
Intervalo de tamaños	Resistencia de prueba mínima, MPa	Resistencia mínima a la tensión, Mpa	Resistencia mínima a la fluencia, MPa
M16-M36	600	830	660
Clase métrica 9.8 para pernos, tornillos y birlos de acero			
M1.6 - M16	650	900	720

1.8. Concentración de esfuerzos

Es importante tener en cuenta la concentración de esfuerzos en materiales dúctiles, debido a que este tipo de material al someterse a una carga fija cede en puntos de alta concentración al momento que el esfuerzo aplicado excede la resistencia de fluencia, produciendo una redistribución de esfuerzos en la pieza sin presentar un deterioro perceptible. Sin embargo, si la carga aplicada es repetitiva, el esfuerzo en los puntos de concentración puede exceder la resistencia y entonces la pieza se rompe eventualmente por fatiga, el esfuerzo localizado puede darse en cualquier discontinuidad, sean agujeros, ranuras, rugosidades de superficie de cualquier clase, tales como soldaduras, corrosión, entre otros, además los puntos de terminación de los filetes de rosca [35].

1.9. Acumulación de esfuerzos en la rosca

Los pernos y tornillos son elementos que tienen filetes enrollados en forma de hélice sobre una superficie cilíndrica y son unos de los elementos más utilizados en las máquinas herramientas y estructuras. En distintos casos el tornillo puede verse sometido a cargas variables combinadas provocando una imperfección en su núcleo, por lo que se aplican una teoría de falla por fatiga en sus diseños. Los filetes del tornillo pueden presentar un defecto de barrido, es decir que parte de la hélice del tornillo se desplaza, debido al esfuerzo cortante que se genera en ellos al encontrarse el perno sometido a tracción [36].

1.10. Esfuerzo cortante en los filetes de una rosca

La zona roscada del perno y la tuerca en una conexión se encuentran sometidas a esfuerzos cortantes, esto se debe a que los filetes se encargan de transmitir la fuerza a tracción del perno. La falla se presenta de acuerdo con las resistencias relativas del perno y de la tuerca, el caso más común se da cuando la tuerca es más débil que el tornillo, de tal manera que los filetes de la tuerca llegan a fallar por cortante. Sin embargo, al tener la misma resistencia el perno y la tuerca podría presentar un barrido en conjunto a través del diámetro de paso. Al proporcionar un material con alta resistencia a la tracción para el perno y un material con mayor ductilidad para la tuerca se obtiene una distribución de la carga uniforme a lo largo de la rosca del perno [37].

1.11. Proceso de fabricación del perno

El primer paso para la fabricación del perno es el procesamiento de alambrón de acero sea en rollo o en barra sometido a procesos químicos tales como el decapado, el cual ayuda a retirar cualquier partícula de óxido sumergiendo el acero en una mezcla de agua y ácido clorhídrico, a continuación, el fosfatizado que no es más que un enjuague del alambrón después de ser sometido al decapado. El proceso de enjuague se realiza con una solución de fosfato compuesta por agua, ácido fosfórico, ácido nítrico, óxido de zinc y nitrito de sodio [38].

Los procesos mecánicos dan la forma al perno donde se inicia con un trefilado para reducir el diámetro del alambrón estirándolo en frío y de esa manera emparejándolo, después se realiza el estampado es decir se somete el metal a una carga de compresión

entre dos moldes para dar forma a la cabeza y el tornillo o bulón. A continuación, se procede a realizar el roscado y acabado del elemento, este proceso se realiza a través de rodillos circulares para una laminación en frío o por arranque de viruta en tornos. Por último, se realiza un tratamiento térmico de galvanizado o zincado en frío de ser requerido [39].

1.12. Sujeción máquina de pruebas universal

Las probetas para ensayos a tensión en la sección transversal adoptan varias formas las cuales son redonda, cuadrada o rectangular. Los extremos de una probeta redonda pueden ser simples, con cabezas lisas o roscadas, la sección rectangular posee extremos simples. Por lo tanto, debe emplearse un dispositivo de sujeción adecuado para cada tipo de probeta [40].

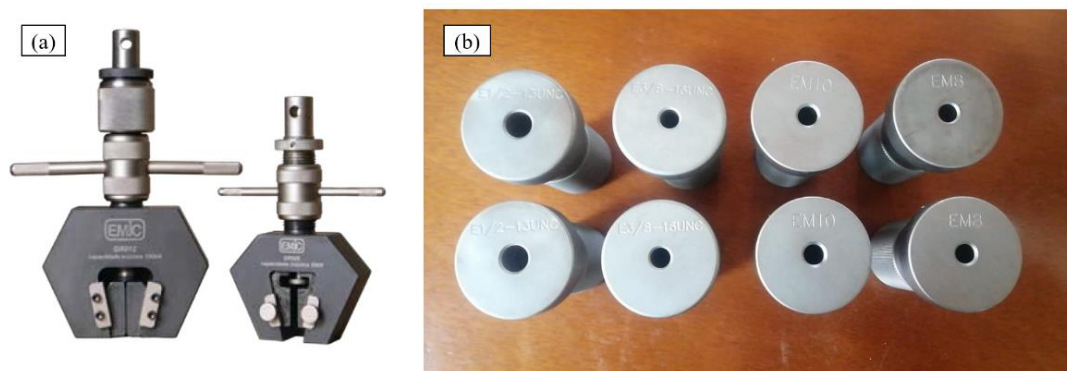


Figura 8. (a) Sistema de sujeción, (b) Accesorio de sujeción [41]

En la Figura 8 (a), se muestra un sistema de sujeción mecánica con mordazas diseñadas para sujetar las diferentes probetas sean circulares, rectangulares o cuadradas para ser sometidas a tracción. Sin embargo, para un ensayo de tracción con probetas de extremos roscados es necesario el uso de accesorios de sujeción como se aprecia en la Figura 8 (b), los cuales presentan una rosca interior para sujetar las probetas. Cabe recalcar que estos tipos de accesorios se encuentran estandarizados [42].

1.13. Factores que influyen en el desempeño de los anclajes

1.13.1. Falla por fractura del acero

Este tipo de falla se presenta en anclajes mecánicos y adhesivos sometidos a tracción o corte, donde los esfuerzos que se encuentran dentro del dispositivo de anclaje superan la resistencia del acero y procede a la rotura del elemento [43]. Según Roldán et al. [44] la falla del acero se da en anclajes químicos con empotramientos de profundidades considerables, donde la resistencia a compresión del concreto no afecta al anclaje. En la Figura 9 se aprecia un bloque de hormigón en el cual se produce la falla por fractura del acero al aplicar una carga N a tracción en un anclaje de resina.

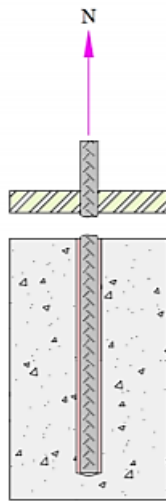


Figura 9. Falla por fractura del acero a tracción [45]

1.14. Tratamientos superficiales

La protección del acero frente a la corrosión mediante tratamientos de su superficie se consigue con la pasivación, mediante el empleo de un metal aleado o por medio de la aplicación de un recubrimiento que actuará en función del tipo de ambiente en que se encuentre la pieza y las características de su superficie.

1.14.1. Galvanizado en caliente

En la investigación realizada por Yildiz [46] se refiere al galvanizado en caliente (HDG, por sus siglas en inglés) como un proceso químico el cual recubre al acero mediante una capa de zinc (Zn) o sus aleaciones para proteger al elemento contra la corrosión. Este proceso se realiza en un baño de zinc fundido a una temperatura promedio de 452.5 °C. En la superficie más externa del acero se compone de un zinc

puro denominado eta (η) el cual posee un 0.03 % de hierro (Fe), además de contener compuestos intermetálicos de Fe - Zn como zeta (ζ), delta (δ) y gamma (Γ) que contienen porcentajes promedio de Fe del 6.5, 10.5 y 24.5 % respectivamente. Por lo tanto, el hierro se incrementa desde la superficie del elemento hacia las capas internas del mismo, variando las propiedades mecánicas entre sí, como variar la ductilidad de la probeta, aumentar el límite elástico entre otros. Esta variación es ocasionada por heterogeneidad en la estructura.

La fase η es una solución sólida de zinc la cual tiende a desaparecer si se realiza un tratamiento térmico posterior al acero galvanizado en el cual permite incrementar la fase zeta disminuyendo la fase eta [47]. En la Figura 10 se observa la fase ζ la cual se refiere a los cristales disueltos que flotan de manera permanente, la fase δ posee un gran espesor y la fase Γ es casi imperceptible al ojo humano [48]. En la Figura 10 (a) se muestra la zona rica en Zinc, del diagrama de fases en equilibrio Zn - Fe con características de temperatura y % en peso de Zn y en la Figura 13 (b) se identifica las fases delta (δ), zeta (ζ) y eta (η) en un elemento real.

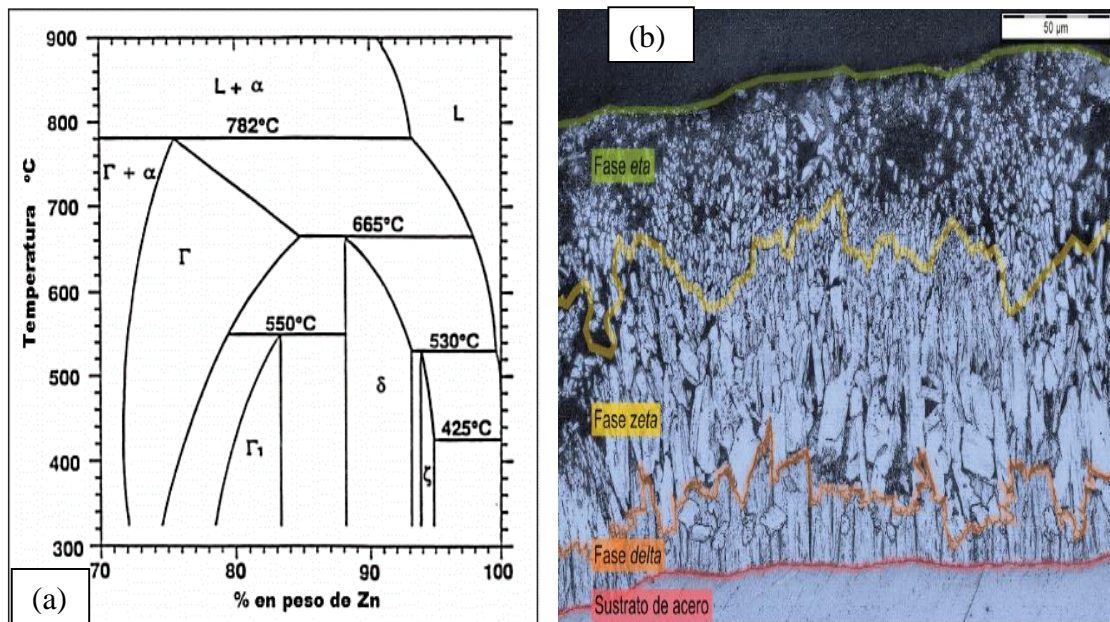


Figura 10. Zona rica en Zn, (a) Diagrama de fases en equilibrio Zn - Fe [47] y (b) Fases en capa de galvanizado [48]

Para el galvanizado en caliente existe otro recubrimiento específico para los pernos de anclaje como el acero galvanizado con una aleación de zinc - magnesio - aluminio (ZnMgAl), el cual es un proceso químico de baño de zinc parcialmente cargado por magnesio y azufre donde el magnesio crea una capa superficial protectora contra la corrosión en aceros laminados en frío y caliente siendo apropiado para piezas utilizadas en acople, zonas cerradas, partes huecas entre otros [49]. Finalmente, el galvanizado es la alternativa más común para los pernos ASTM A307 y las varillas roscadas ASTM A36 / A36M y ASTM F1554 [50].

- Tropicalizado

El tropicalizado se refiere a un complemento de recubrimiento en el proceso de galvanizado, este tratamiento consiste en aplicar una capa de cromo de 1 mm de espesor como máximo a una temperatura relativamente baja que no supera los 60 °C. Este tipo de recubrimiento es de color amarillo iridiscente es decir que muestra o refleja varios colores. La característica principal del tropicalizado es su alta resistencia a la corrosión en lugares con clima cálido y tiende a aumentar la resistencia de probetas galvanizadas. La aplicación principal de este tratamiento es en elementos ubicados en lugares con alto nivel de humedad debido a que el tropicalizado presenta una excelente resistencia al agua [51].

1.14.2. Zincado

En la actualidad existen dos tipos de recubrimiento por zincado los cuales son mecánico y electrolítico. El zincado mecánico se refiere al bombardeo de partículas metálicas sobre la superficie del metal a recubrir, este proceso se realiza mediante bolas de vidrio de diferentes dimensiones ubicadas en una campana rotatoria, donde se elimina cerca del 100 % la fragilización por aporte de hidrógeno en la superficie del elemento y facilita la desorción espontánea, es decir el bombardeo de partículas en el elemento a recubrir es más sencillo. Además, el zincado mecánico posee características importantes como la excelente resistencia a la corrosión, carecen de cianuros, los revestimientos soportan un tratamiento posterior de lubricantes, pasivados o pintura entre otros. En la Figura 11 se aprecia este tipo de recubrimiento superficial el cual es aplicable en piezas de acero de alta resistencia como tornillos,

pernos, tuercas, muelles, flejes y se lo identifica por poseer un color gris mate sin brillo en su acabado [52].

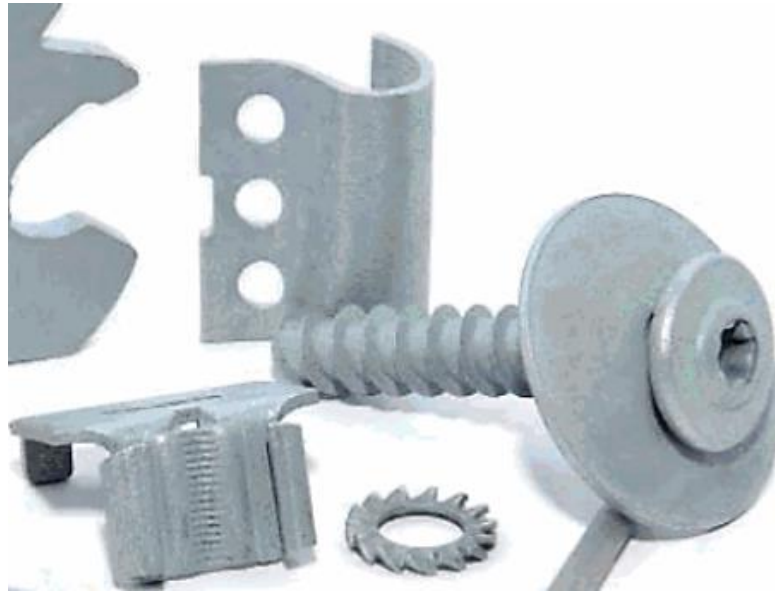


Figura 11. Arandela, tornillo y elementos de acople sometidos a proceso de zincado mecánico [52]

El zincado electrolítico se refiere a un tratamiento superficial por electrólisis donde se aplica el zinc en forma continua al elemento y se decapa por electrodeposición [53] con la finalidad de proteger el acero ante la corrosión. Este proceso posee un espesor de capa de zinc de menor o igual a $20\text{ }\mu\text{m}$, debido a que este tipo de recubrimiento es alcalino y la resistencia a la corrosión es considerablemente elevada. Además del zincado se aplica un pasivado posterior como zincado negro trivalente, amarillo o dorado trivalente, plateado, azul, blanco entre otros, para reforzar la protección de la pieza ante la oxidación blanca y roja [54]. En la Figura 12 se observa una solución acuosa denominada electrolito, donde un metal de sulfato de cobre funcionará como recubrimiento para una pieza de latón produciendo el zincado electrolítico.

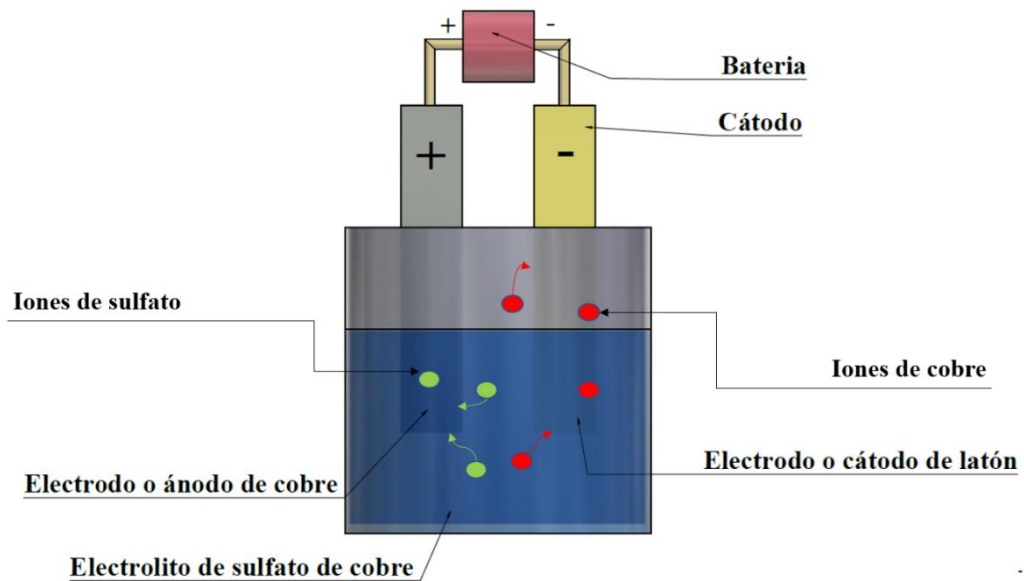


Figura 12. Zincado electrolítico con recubrimiento de cobre para una pieza de latón

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

1.15. Ensayo a tracción

Este tipo de ensayo se ejecuta en probetas de varios materiales, donde se produce un esfuerzo axial continuo que empieza desde cero hasta llegar al punto de ruptura. La probeta al encontrarse sometida a tracción presenta elongaciones, por lo tanto, el elemento tiende a reducir su diámetro, así también se genera una variación en su temperatura contribuyendo a deformar el elemento, este fenómeno es ocasionado por el cambio que existe en las áreas de la sección transversal. Las probetas deben ser estandarizadas, de este modo podrán ser utilizadas en la máquina universal de ensayos a tracción [55]. En la Figura 13 se muestra un prototipo de perno de anclaje en el cual se aplican fuerzas en los dos extremos que son producidas experimentalmente a tracción con el objetivo de determinar la resistencia de la probeta.

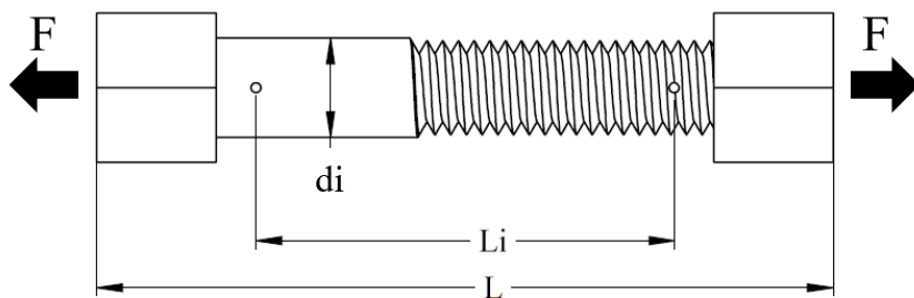


Figura 13. Perno de anclaje para ensayo a tracción [55]

Donde:

F: Fuerza a tracción.

di: Diámetro preliminar (mm)

Li: Longitud preliminar entre señales (mm)

L: Longitud total del elemento (mm)

En la Figura 14 se muestra la curva tensión - deformación donde M es el punto máximo, evidenciando que existe un incremento en la tensión generada en los metales, de manera que continúen con su deformación plástica, en ciertos eventos la tensión disminuye hasta llegar al punto F el cual significa que la probeta ha llegado a la rotura. La resistencia a tracción denominada RM, se refiere a la tensión máxima que resiste un elemento y en el caso de ser constante la tracción en un intervalo de tiempo posterior se producirá la rotura del componente. Del punto M en adelante en alguna sección de la probeta se produce una reducción del diámetro “di” de la Figura 16 en el cual las deformaciones siguientes se enfocarán en ese sector específicamente, este tipo de suceso se denomina estricción [56].

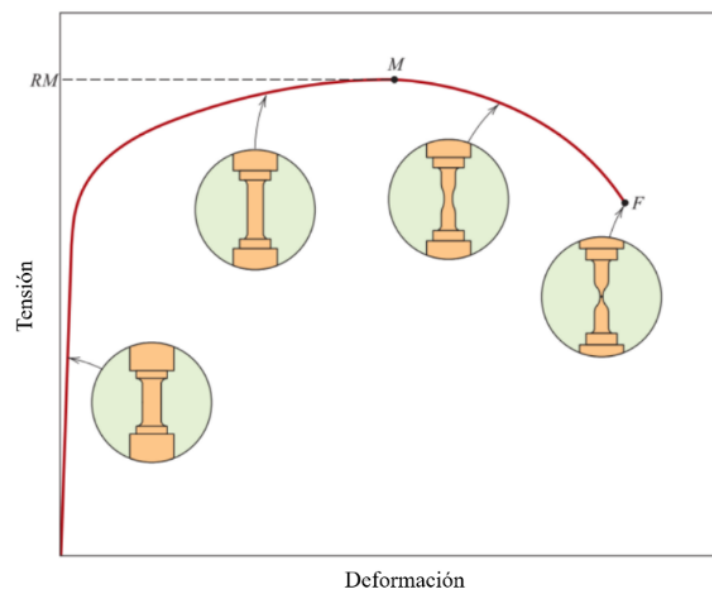


Figura 14. Curva esfuerzo - deformación [56]

La resistencia de un material depende de su capacidad de tolerar una carga excesiva sin evidenciar deformaciones, fracturas o roturas totales. El proceso de experimentación adecuado para determinar propiedades mecánicas tales como la relación del esfuerzo Normal promedio, módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, límite de fluencia, límite elástico, deformación Normal promedio, alargamiento y resistencia a tensión es el ensayo a tracción [57].

Los materiales dúctiles como el acero estructural, así como muchas aleaciones de otros metales pueden deformarse sosteniblemente sin romperse a temperaturas Normales. En la Figura 15 se visualiza una curva de esfuerzo deformación generada al someter probetas a cargas axiales. A continuación, se presenta los componentes de la curva de esfuerzo deformación.

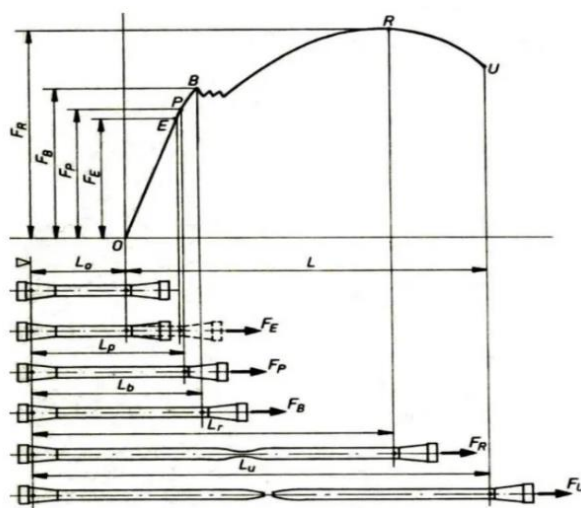


Figura 15. Diagrama esfuerzo deformación de materiales dúctiles en tensión [57]

- **Límite de elasticidad (E):** Es la deformación máxima que soporta un cuerpo, siendo esta recuperable al dejar de actuar las fuerzas en el objeto [58].
- **Límite de proporcionalidad (P):** El mayor esfuerzo en el que el esfuerzo es directamente proporcional a la deformación [59].
- **Límite de fluencia (B):** Se define como el valor de la tensión que soporta la probeta en el momento de producirse el fenómeno de fluencia. Este fenómeno tiene lugar en la zona de transición entre las deformaciones elásticas y plásticas

y se caracteriza por un rápido incremento de la deformación sin aumento apreciable de la carga aplicada [60].

- **Carga de rotura (R) o límite de rotura:** Se representa como la carga máxima por unidad de sección que resiste el material antes de romperse [60].
- **Alargamiento de rotura:** Como se aprecia en la Figura 18 existe un alargamiento progresivo que sufre el material antes de romperse. El alargamiento es una deformación que se mide en el tiempo al aplicarle carga a una muestra [61]
- **Rotura efectiva (U):** Se denomina el punto en que un material no soporta el aumento de esfuerzo provocando la ruptura de este.
- **Estricción:** Es la reducción uniforme en toda la longitud calibrada que sufre la probeta en la zona de rotura. El alargamiento y la estricción se usan para obtener el grado de ductilidad de los materiales [62].

El ensayo a tracción consiste en la fabricación de probetas de un material de forma y tamaño estándar con una sección transversal circular constante, con extremos de mayor tamaño para evitar posibles fallas en empuñaduras. Un proceso anterior del ensayo es marcar las probetas con un punzón para ubicar su longitud base L_0 , como se muestra en la Figura 16.

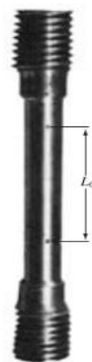


Figura 16. Probeta estándar para ensayo a tracción [63]

A continuación, se realizan mediciones del área en la sección transversal inicial de la probeta y en la longitud base. Se aplica una tensión uniaxial creciente a velocidad moderada y constante hasta que la probeta falle, este procedimiento se realiza mediante el uso de una máquina universal como la que se muestra en la Figura 17.

1.16. Máquina universal

La máquina universal de ensayos a tracción es similar a una prensa, con capacidad de realizar pruebas a tensión, compresión o flexión en materiales para evaluar sus propiedades. Este tipo de máquina aplica una fuerza a través de mordazas las cuales son manuales o hidráulicas. Además, su función es medir la resistencia mecánica de varios materiales como el acero, concreto entre otros. Este mecanismo posee un conjunto de servocontrol el cual efectúa cargas controladas sobre un elemento determinando gráficamente su deformación y la carga en el instante de falla [64]. En la Figura 17 se muestra una máquina universal hidráulica con su sistema de control.



Figura 17. Máquina universal de ensayo a tracción [65]

1.17. Varillas de construcción

La varilla corrugada se refiere a un elemento tipo barra horizontal el cual posee una sección circular, con relieves Hi - bond que permiten un alto ajuste con el concreto. Este tipo de varilla se utiliza en estructuras de concreto armado para hogares, edificaciones, puentes, entre otros. Además, la composición química, propiedades mecánicas y tolerancias dimensionales se encuentran bajo la Norma ASTM A615 - 96 a [66]. En la Tabla 3 se muestra en general los tipos de varillas más utilizadas en la industria con su respectiva aplicación mostrando la variedad de trabajo de la varilla corrugada.

Tabla 3. Aplicaciones de varillas corrugadas más utilizadas en la industria [66]

	5/32 "	3/16 "	1/4 "	5/16 "
Losas sólidas y losas aligeradas	X	X	X	X
Castillos ahogados en muros de mampostería				X
Refuerzo horizontal en muros de mampostería. (Tipo escalerilla)	X	X		
Anillos o estribos	X	X	X	X
Refuerzo adicional para sistema vigueta - bovedilla		X	X	X
Dalas y castillos			X	X
Vigas y trabes			X	X
Elementos prefabricados	X	X	X	X
Postes de concreto		X	X	X

1.18. Materiales

Los materiales para los pernos de anclaje según la Norma ASTM corresponden a las siguientes especificaciones:

- ASTM A307

- ASTM A325
- ASTM A325M
- ASTM A449
- ASTM A490
- ASTM A490M
- ASTM F1852

Así también para los materiales de las varillas de anclaje y varillas roscadas según la Norma ASTM corresponde a las siguientes especificaciones:

- ASTM A36/A36M
- ASTM A193/A193M
- ASTM A354
- ASTM A449
- ASTM A572/A572M
- ASTM A588/A588M
- ASTM F1554

Donde el material ASTM F1554 es el más utilizado para fabricar este tipo de varillas. Además, la especificación ASTM A449 es viable para varillas de anclaje de alta resistencia y varillas roscadas en todo tipo de diámetro. Así también las roscas deben ajustarse con el Estándar Unificado Serie de ASME B18.2.6 y bajo una tolerancia de Clase 2A [67].

1.19. Adherencia entre perno y hormigón

En los anclajes existe transferencia de la tensión del acero hacia el hormigón a través de la adherencia. La parte superior del anclaje alcanza la tensión en su máximo nivel y decrece en la profundidad de la conexión. La longitud del perno que absorbe el hormigón la cual es de suma importancia para el desarrollo de la resistencia del acero en tracción corresponde a la rugosidad del bulón. Por lo tanto, la adherencia a través de la carga sostenida se ve afectada por una baja fluidez del hormigón en la sección más cercana a la superficie [68].

CAPÍTULO II

PARÁMETROS DE EXPERIMENTACIÓN

Para el desarrollo del presente trabajo se realiza una investigación de mercado para identificar las diferentes opciones de pernos de anclaje existentes y obtener las probetas de acuerdo con los materiales que designen las Normas establecidas sobre tornillería. Para el presente estudio se utiliza tres tipos de acero siguiendo las Normas ASTM 193, ISO 4017 y ASTM A706 para varilla roscada, pernos milimétricos de cabeza hexagonal y varilla corrugada respectivamente.

El material del perno de anclaje debe ser lo suficientemente dúctil para permitir la elongación del perno sin llegar a la rotura a la vez de ofrecer la resistencia adecuada para soportar los esfuerzos solicitados. La Tabla 4 muestra las propiedades mecánicas de la varilla de acero B7 de 1/2 pulgada de diámetro el cual posee valores máximos de resistencia a la tracción y límite elástico de 986 y 884 MPa respectivamente, también se presentan valores de contracción y alargamiento mínimos y máximos de 56, 57 % y 18, 21 % en cada caso.

Tabla 4. Propiedades mecánicas del Acero 4140 grado B7 según la Norma ASTM A193 [69]

Resistencia a la tracción min. (MPa)	Límite elástico min. (MPa)	Alargamiento min. (%)
861.84	723.25	16

La calidad en la aleación del acero utilizado para la fabricación del esparrago permite un mejor desempeño en condiciones de alta presión y temperatura, posee una amplia versatilidad para la fatiga y torsión [69].

Los pernos milimétricos de este estudio se encuentran en el mercado basado en la Norma ISO 4017 o (DIN 933) [70], la cual especifica las características de los pernos

de cabeza hexagonal desde diámetros de M1.6 hasta M24 y longitudes nominales hasta 150 mm, la Tabla 5 muestra las propiedades mecánicas en la cual se incluyen los valores mínimos y nominales de 800 MPa en ambos casos, y 640 MPa tanto para la resistencia a tracción y límite elástico, en cuanto al alargamiento se incluye únicamente el valor mínimo (mín) de 12 % y el estrés bajo carga muestra el valor nominal (nom) de 58 MPa, todo esto para pernos de diámetros menores o igual a M16 según la calidad de mayor comercialización 8.8 [71].

Tabla 5. Propiedades Mecánicas de pernos milimétricos ISO 4017 (DIN 933) [72]

Resistencia a la tracción (MPa)		Límite elástico al 0.2% a compensar la elongación no proporcional (MPa)		Alargamiento (%)	Estrés bajo prueba de carga (MPa)
Nom.	Mín.	Nom.	Mín.	Min.	Nom.
800	800	640	640	12	58

Para el mecanizado de pernos de anclaje se trabaja con varilla microaleada o corrugada, la Tabla 6 presenta las propiedades mecánicas de la varilla sometida a tracción, basado en la ficha técnica que presenta Novacero según las Normas INEN 2167 [73] y ASTM A706 [74]. La varilla sometida a tracción muestra valores mínimos y máximos de límite de fluencia de 420 y 540 MPa respectivamente, así también la varilla corruga posee una resistencia a tracción mínima de 550 MPa, en cuanto al porcentaje de alargamiento existen diferentes diámetros desde menores a 20, entre 20 y 22 y mayores a 40 mm con valores de 14, 12 y 10 % de alargamiento en cada caso.

Tabla 6. Propiedades mecánicas de varilla corrugada según la Norma ASTM A706 [74]

Límite de fluencia		Resistencia a la tracción	Alargamiento mínimo en L=200 mm		
Min (MPa)	Max (MPa)		d≤20 (%)	20 ≤d≤22 (%)	d≥40 (%)
420	540	550	14	12	10

2.1. Longitud nominal de probetas roscadas para ensayo a tracción

La longitud de las probetas se eligió a través de la Tabla 7 donde se encuentran las longitudes nominales para tornillos y espárragos, con la recomendación de en lo posible no utilizar las medidas en paréntesis, esta tabla obedece a la Norma NTE INEN 1250: 2013 la cual especifica las longitudes para tornillería tales como pernos, espárragos, tornillos y prisioneros [75].

Tabla 7. Longitudes nominales para tornillos y espárragos [75]

Longitudes nominales		
2/2, 5/3	4/ 5/ 6	(7)/ 8/ (9)
10/ (11)/ 12	14/ 16/ (18)	20/ (22)/ 25
(28)/ 30/ (32)	35/ (38)/ 40	45/ 50/ 55
60/ 65/ 70	75/ 80/ 85	90/ (95)/ 100
(105)/ 110/ (115)	120/ (125)/ 130	140/ 150/ 160
170/ 180/ 190	200/ 220/ 240	260/ 280/ 300

2.2. Definición de tamaño muestral

La selección del tamaño muestral es una decisión importante en el área experimental, y consiste en la determinación del número de réplicas que deben hacerse en un estudio. Correa y Burgos [76] implementaron una metodología estadística para ensayos de productos terminados, en la cual definieron una confiabilidad de estudio del 95% y un valor de potencia del 95%, de tal manera que obtuvieron un número mínimo de réplicas requerido de 8 probetas para garantizar las condiciones de un estudio [77], la Tabla 8 muestra el número de probetas para cada caso y el total de ensayos propuestos para esta investigación.

Tabla 8. Cantidad de probetas para ensayos a tensión

Factores	Nomenclatura				Total de probetas para ensayo a tensión
	3/8 ”– 16 UNC	1/2 ” – 16 UNC	M8	M10	
Mecanizadas	8	8	8	8	
Sin mecanizar	-	8	8	8	
Mecanizados	8	8	8	8	
galvanizados					
Sin mecanizar	-	8	8	8	
galvanizados					
Cantidad total de probetas	16	32	32	32	112

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

En la Tabla 8 se aprecia que los pernos sin mecanizar galvanizados y sin galvanizar de 3/8 ” no cuentan con un número de probetas, esto se debe a que en el mercado actual para este tipo de pernos no existe una presentación en rosca completa. Por lo tanto, ese caso de estudio se elimina por descarte.

En la Figura 18 se muestra un modelo 3D de los probetas de 1/2 ” - 13 UNC galvanizados y sin galvanizar de tipo prefabricados y mecanizados por arranque de viruta, utilizados en ensayos a tracción realizado en la máquina universal TestResources del laboratorio de resistencia de materiales de la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Quito Sur. Estos modelos sirven de guía para la fabricación de las probetas por arranque de viruta de 1/2 ” - 13 UNC, 3/8 ” - 16 UNC, M8 y M10, de este modo se conocerá la apariencia y las medidas exactas de los pernos de anclaje al obtener los planos de cada elemento.

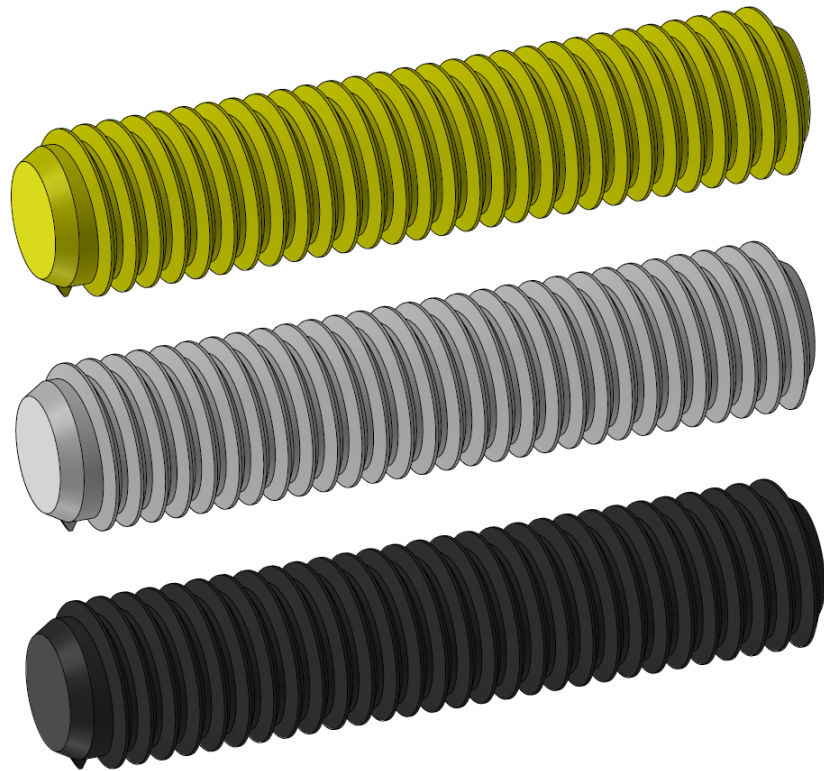
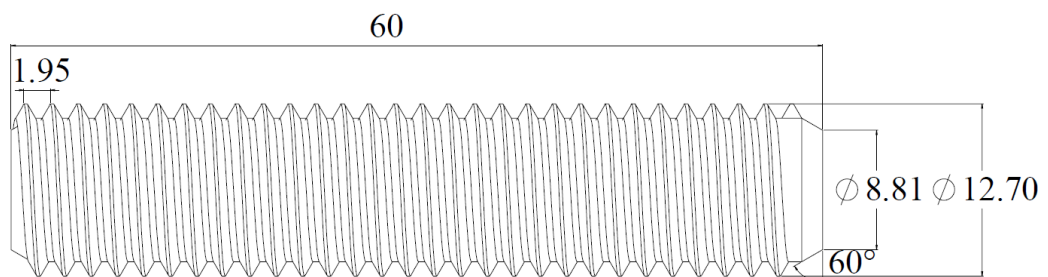


Figura 18. Probetas galvanizadas, mecanizadas y prefabricadas de 1/2 " - 13 UNC

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

En la Figura 19 (a) y (b) se muestra las dimensiones de mayor importancia para la fabricación de las probetas de 1/2 " - 13 UNC y 3/8 " - 16 UNC donde el diámetro externo e interno del perno de 1/2 " son 12.70 y 8.81 mm respectivamente, la longitud es de 60 mm, posee dos chaflanes de 60 ° de inclinación y un paso de rosca gruesa de 1.95 mm. Para el perno de 3/8 " el radio externo e interno son de 4.765 y 3.015 mm, la longitud es de 60 mm con dos chaflanes de 60 ° en cada cara lateral y un paso de rosca gruesa de 1.59 mm.

(a)



(b)

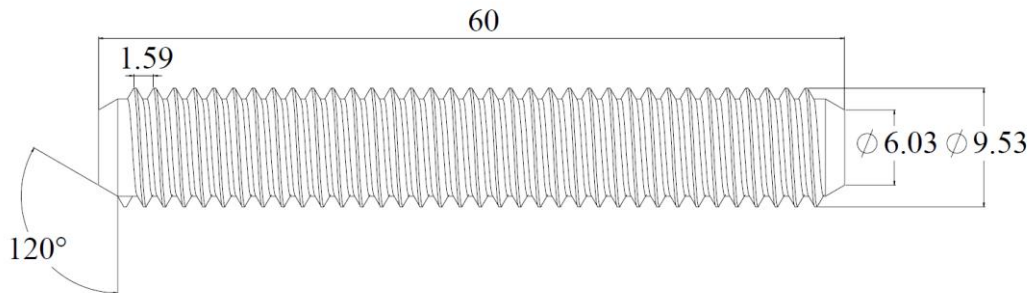
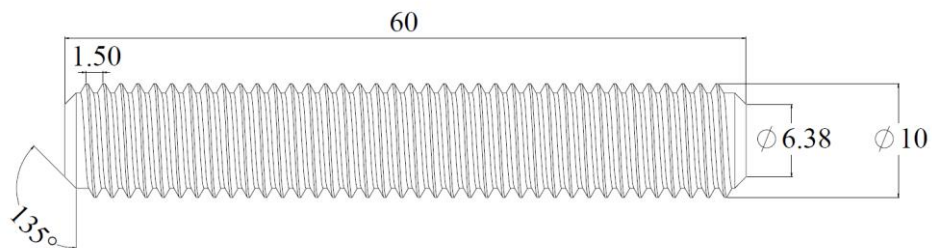


Figura 19. Dimensiones de probetas de ensayo a tracción, (a) 1/2 " - 13 UNC y (b) 3/8 " - 16 UNC

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

Las dimensiones de los pernos de anclaje métricos muestran en la Figura 20, en la sección (a) se describe las medidas de una probeta M10 la cual posee una longitud de 60 mm, un diámetro exterior de 10 mm, diámetro interior de 6.38 mm, dos chaflanes de 45 ° de inclinación y un paso de rosca gruesa de 1.5 mm. En la sección (b) el perno M8 posee diámetros externo e interno de 8 y 4.65 respectivamente, longitud de 60 mm, dos chaflanes de 45 ° de inclinación y un paso de rosca gruesa de 1.25 mm.

(a)



(b)

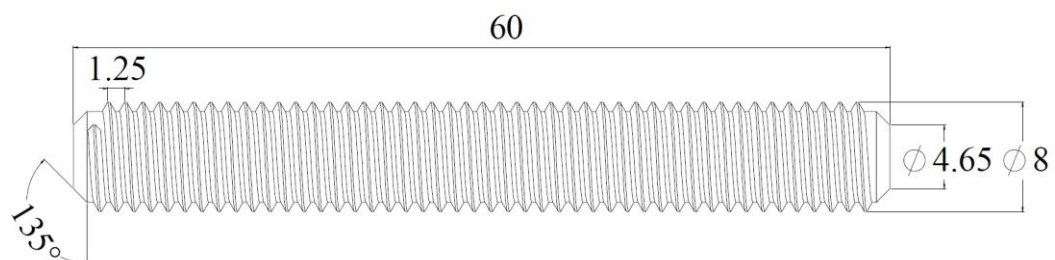


Figura 20. Dimensiones de probetas de ensayo a tracción, (a) M10 y (b) M8

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

Para el presente estudio parte de los pernos prefabricados y mecanizados se sometieron a un proceso de galvanizado tropicalizado tal como se muestra en la Figura 21, el cual consiste en:

- Desengrase de los pernos.
- Primer enjuague de las piezas en agua corriente.
- Activado de ácido clorhídrico al 60 % en los pernos de anclaje.
- Segundo enjuague con agua corriente.
- Ubicación de los pernos de anclaje en celda de galvanizado.
- Tercer enjuague con agua corriente.
- Brindar un sello de tropicalizado en los pernos de anclaje.
- Cuarto enjuague en agua común.
- Finalmente se realiza un proceso de secado a las probetas mediante una centrífuga.



Figura 21. Probetas M10 mecanizadas galvanizadas

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

En la presente investigación se utilizó una máquina universal de la marca TestResources la cual fue replicada en el software Solidworks estudiantil para describir cada sección de la máquina y su aplicación. En la Figura 22 se muestra las

partes de la máquina universal donde la sección (a) y (b) constan de una mordaza principal que sujeta a un eje roscado de 80 mm de diámetro con una perforación de 24.93 mm en la cara lateral y un acople de acero para el ajuste de un cilindro de 78 mm de diámetro con tres perforaciones en cara superior, inferior y lateral de 50.01, 41.97 y 24.93 mm respectivamente. Además, cuenta con un pasador para el acople entre eje roscado y el cilindro en el cual se ubica una mordaza secundaria con rosca interna donde se alojan los pernos que serán sometidos a tracción.

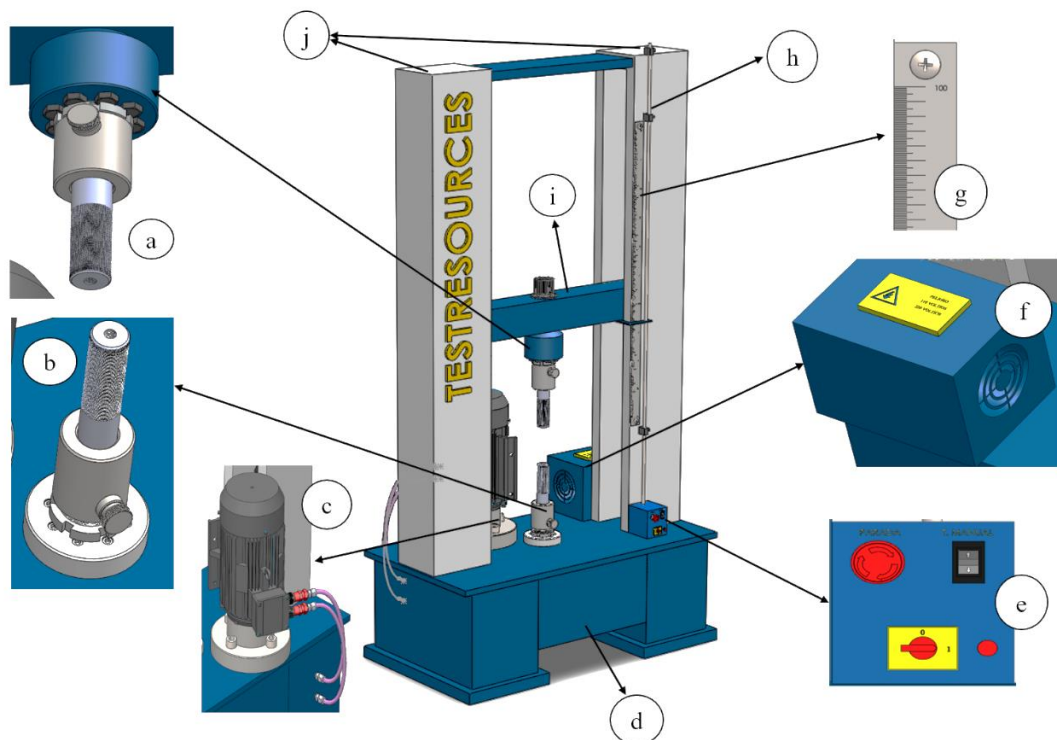


Figura 22. Máquina universal TestResources

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

En la sección (c) de la Figura 22 se muestra un motor alimentado a 220 voltios que sede energía cinética a una bomba la cual aumenta la presión del aceite del banco hidráulico. La sección (d) de 1000 x 380 x 600 mm funciona como soporte de todos los elementos que componen la máquina universal. La botonera especificada en la sección (e) cuenta con un selector de encendido y apagado, luz piloto, un paro de emergencia en un pulsador tipo hongo y un interruptor simple bipolar para el desplazamiento manual del eje transversal de la sección (i). La máquina universal cuenta con una caja eléctrica de dos tipos de voltaje 110 y 220 voltios. Así también cuenta con una regla metálica acoplada a un eje vertical con una guía de acero mostrada

en la sección (h) que permite al operario observar cuanto se desplaza el eje de la sección (i). Por último, en la sección (j) se observa dos rieles verticales de 1670 x 240 x 200 mm cada una y en las cuales transita el eje transversal en forma ascendente y descendente.

2.3. Ensayos a tensión de los pernos de anclaje

Para realizar los ensayos a tracción de los pernos roscados se realiza un reconocimiento previo de la máquina universal, en este caso es una máquina TestResources del laboratorio de Resistencias de materiales de la Universidad Politécnica Salesiana - Sede Quito Sur, equipado con los accesorios para roscas estándar. Estos accesorios de sujeción soportan una capacidad máxima 150000 N (15 Toneladas) y están diseñados especialmente para sujetar probetas roscadas, los accesorios cuentan con 4 medidas estándar, 2 milimétricos M10 y M8 y dos en pulgadas 3/8 ”- 16 UNC y 1/2 ” - 13 UNC.

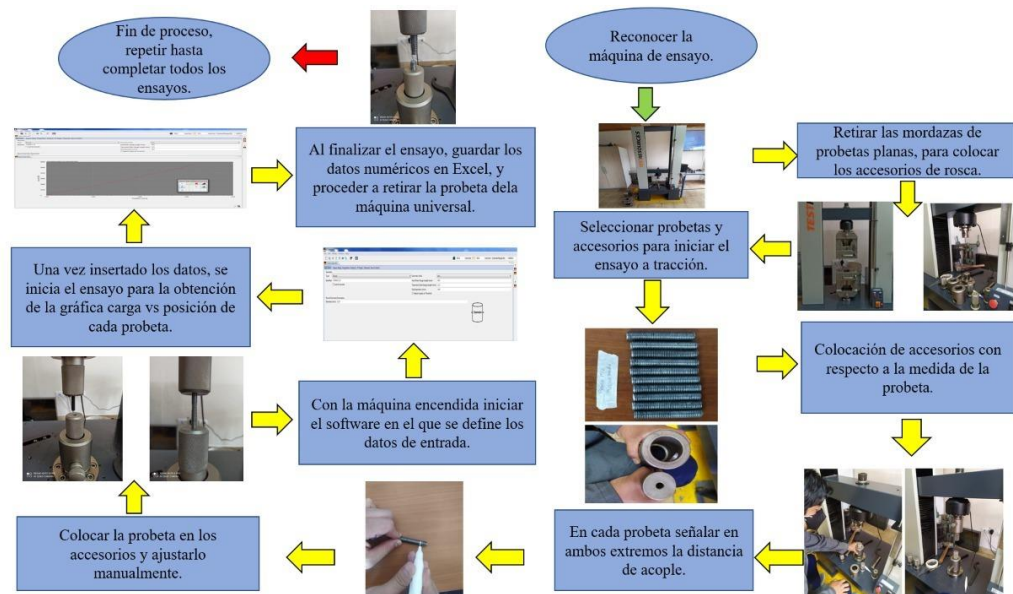


Figura 23. Flujograma de proceso de ensayo a tensión

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

Para realizar el proyecto según el flujograma que presenta la Figura 23, se debe ejecutar varios ensayos de prueba y calibración asegurando la fiabilidad de los 112 experimentos, lo cual permite iniciar con el estudio desde el etiquetado de las muestras para evitar cualquier tipo de confusión al momento del montaje de cada elemento, señalando en cada extremo de los pernos M10, M8 y 3/8 ” - 16 UNC la

distancia de acople de 10 mm para obtener una separación entre mordazas de 40 mm, en el caso de los pernos de 1/2 " - 13 UNC se marca una distancia de 15 mm en cada extremo disminuyendo la separación entre mordazas a 30 mm, debido a que, si aumenta el diámetro de probeta la distancia de sujeción debe ser mayor para evitar un barrido de rosca en los ensayos. A continuación, las muestras se ubican en los accesorios después de desplazar el eje superior de forma manual a una velocidad relativamente menor para evitar golpes entre mordazas.

Para llevar el control del ensayo y adquirir los datos, se usa el software R controller en el cual se definen los parámetros de control necesarios para obtener los resultados requeridos, el software dispone de una variedad de parámetros preestablecidos de acuerdo con las Normas de ensayo comunes ASTM F606, ISO 898 - 1 [78].

Una vez habilitado el software se define los datos según la probeta, en la sección de muestra se debe incluir el tipo de elemento en este caso redondo, el diámetro en milímetros, la separación de agarre de 40 o 30 mm según el perno, en la sección de configuración de informe colocar el nombre del ensayo, en adquisición incluir el título para la gráfica y modificar el intervalo de caída a un 60% para obtener una ruptura de las probetas, en análisis seleccionar los tipos de resultado requerido en este caso son carga máxima, resistencia máxima a la tracción y límite elástico, en la pestaña de canales especificamos las unidades en Sistema Internacional. Finalmente, por seguridad en la sección de servo control modificar el rango de sobrecarga hasta un aproximado de 140000 N para evitar sobrepasar el límite de capacidad de la máquina.

Antes de realizar el ensayo se debe especificar la velocidad a la cual el perno es sometido a tracción, de acuerdo con la Norma ISO 898 - 1 la velocidad no deberá exceder los $25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, para obtener el límite de fluencia o límite elástico en el experimento la velocidad máxima de tensión es de $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ [79]. Por último, el perno es pretensado antes de iniciar el estudio con la finalidad de obtener la gráfica carga vs posición y sus respectivos valores numéricos en Excel. Este proceso se realiza para 112 probetas.

CAPÍTULO III

RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN

3.1. Resultados

3.1.1. Perno mecanizado de 3/8 " - 16 UNC

En la Figura 24 se muestra la curva de esfuerzo vs deformación de una probeta de 3/8 " - 16 UNC mecanizada por arranque de viruta, donde el límite de proporcionalidad y de elasticidad oscilan entre 0 y 1 mm y un esfuerzo promedio aproximado de 250 MPa, este proceso ocurre dentro de la zona elástica y se debe a que la probeta trata de mantener su forma original, el punto de fluencia empieza aproximadamente en 1 mm y 300 MPa permitiendo que el material se comporte de manera plástica en la zona de cedencia y la zona de endurecimiento para alcanzar al esfuerzo último que se encuentra alrededor de los 8 mm y un esfuerzo promedio aproximado de 450 MPa. Toda la zona de estricción transcurre cerca de los 8 y 9.5 mm para finalmente generar el esfuerzo de rotura en los 9.5 mm y 350 MPa aproximadamente, de este modo la probeta se fractura de forma permanente.

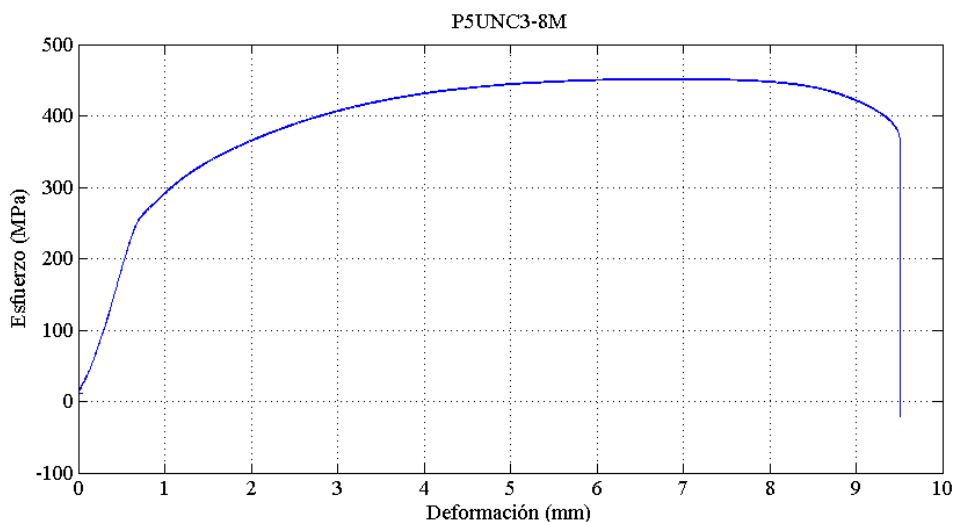


Figura 24. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno de 3/8"-16UNC mecanizado

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

En la Tabla 9 se muestra los resultados obtenidos en el ensayo a tracción realizado a 8 probetas de 3/8 " - 16 UNC mecanizadas por arranque de viruta, la carga máxima de mayor y menor valor se encuentran en los pernos 2 y 5 con 35184.60 y 32066.81 N respectivamente, la resistencia máxima a la tracción mayor se da en la probeta 2 con

496.26 MPa y la menor resistencia se encuentra en la prueba 5 con 452.40 MPa. El límite elástico máximo y mínimo son de 271.56 y 250.74 MPa en las probetas 7 y 3 en cada caso. El promedio de carga, resistencia y límite elástico corresponde a los valores 32749 N, 461.21 MPa y 259.94 MPa, así también la desviación estándar para la carga, resistencia y límite elástico presenta valores relativamente menores los cuales son 1010 N, 14.31 y 7.66 MPa evidenciando que los resultados son relativamente confiables debido a que los valores no se encuentra dispersos excesivamente entre sí.

Tabla 9. Resultados de ensayo a tracción de pernos de 3/8 ” - 16 UNC mecanizados

Nro. De pruebas	Carga Máxima [N]	Resistencia máxima a la tracción [MPa]	Límite elástico [MPa]
1	32822.66	456.71	259.94
2	35184.60	496.26	269.45
3	32280.92	455.42	250.74
4	32239.65	454.83	251.47
5	32066.81	452.40	262.57
6	32549.20	459.20	255.58
7	32466.65	458.04	271.56
8	32381.53	456.84	258.24
Promedio	32749.00	461.21	259.94
Desviación Estándar	1010	14.31	7.66

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

3.1.2. Perno mecanizado galvanizado de 3/8 ” - 16 UNC

En la Figura 25 se muestra la curva de esfuerzo vs deformación de una probeta de 3/8 ” - 16 UNC mecanizada por arranque de viruta y con un galvanizado tropicalizado, donde el límite de proporcionalidad y de elasticidad se encuentran entre 0 y 2 mm y un esfuerzo que oscila entre 200 y 300 MPa, en esta etapa la curva asciende de manera lineal manteniendo la forma de la probeta durante la zona elástica, el punto de fluencia se ubica alrededor de 1 mm y 270 MPa donde el material adopta una comportamiento plástico y permite al operario observar la deformación de la probeta. El esfuerzo último

se encuentra en los 8 mm de deformación y un esfuerzo entre los 400 y 500 MPa. Por último, la rotura del perno se produce aproximadamente a los 10.5 mm y 380 MPa.

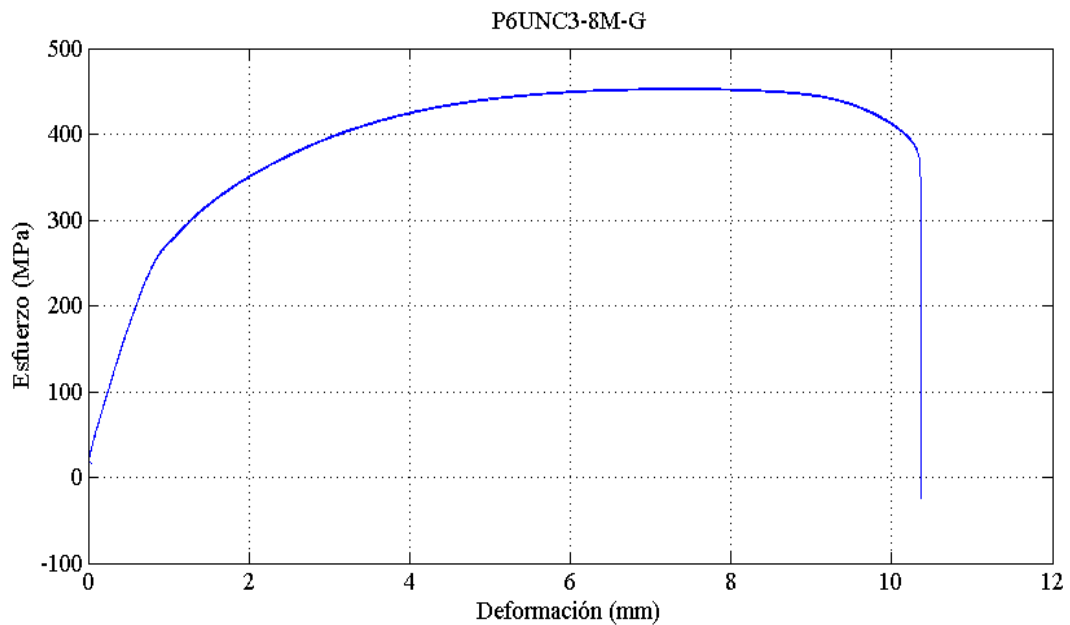


Figura 25. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno de 3/8 " - 16 UNC mecanizado galvanizado

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

En la Tabla 10 se muestra los resultados obtenidos en el ensayo a tracción realizado a 8 probetas de 3/8 " - 16 UNC mecanizadas por arranque de viruta y con un galvanizado tropicalizado, la carga máxima mayor entre los 8 pernos se da en la probeta 1 con 32492.45 N y en la prueba 8 con 31966.21 N se encuentra la carga máxima de menor valor entre los ensayos, la resistencia máxima a la tracción mayor y menor se encuentran en la probeta 1 y 8 con 458.40 y 450.98 MPa. En las probetas 5 y 3 el límite elástico máximo y mínimo son de 250.38 y 197.17 MPa respectivamente. La carga, resistencia y límite elástico promedian con 32233.84 N, 454.75 y 224.27 MPa, además de desviaciones estándar de 190.07 N, 2.68 y 20.55 MPa.

Tabla 10. Resultados de ensayo a tracción de pernos mecanizados galvanizados de 3/8 ” - 16 UNC

Nro. De pruebas	Carga Máxima [N]	Resistencia máxima a la tracción [MPa]	Límite elástico [MPa]
1	32492.45	458.40	235.02
2	32296.40	455.63	240.01
3	32438.28	457.64	197.17
4	32100.35	452.87	238.33
5	32278.34	455.38	250.38
6	32280.92	455.42	198.23
7	32017.80	451.70	207.22
8	31966.21	450.98	227.82
Promedio	32233.84	454.75	224.27
Desviación Estándar	190.07	2.68	20.55

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

3.1.3. Perno mecanizado de 1/2 ” - 13 UNC

La curva de esfuerzo vs deformación de una probeta de 1/2 ” - 13 UNC mecanizada por arranque de viruta se muestra en la Figura 26, donde la zona elástica se encuentra en el rango de 0 a 1 mm y 0 a 300 MPa aproximadamente, evidenciando el límite de proporcionalidad y elasticidad en una recta ascendente, la región plástica transcurre desde 1 hasta 9 mm, el punto de fluencia se encuentra alrededor de 1 mm y 300 MPa, el esfuerzo último oscila entre 6 y 7 mm además de encontrarse en los 500 MPa para finalmente alcanzar el esfuerzo de rotura en una deformación promedio de 9.5 mm y esfuerzo promedio de 450 MPa.

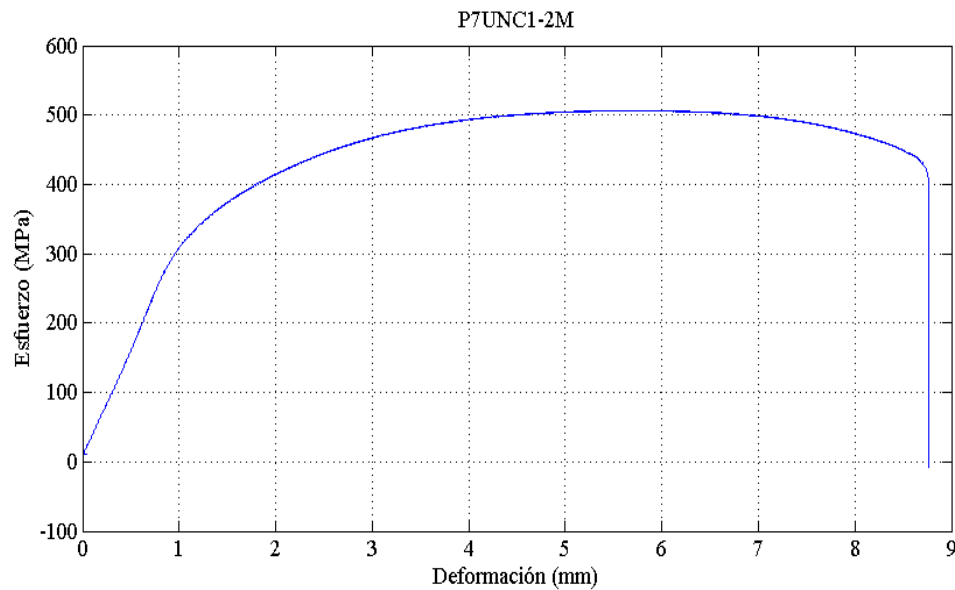


Figura 26. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno de 1/2 " - 13 UNC mecanizado

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

Los resultados del ensayo a tracción realizado en 8 pernos de 1/2 " - 13 UNC mecanizados por arranque de viruta se muestra en la Tabla 11, donde la mayor carga máxima entre los ensayos se da en el probeta 5 con 64933.31 N y en la probeta 3 con 62118.98 N se encuentra la carga de menor valor. La resistencia máxima a la tracción de la probeta 5 y 3 con valores de 529.12 y 506.19 MPa son la máxima y mínima resistencia respectivamente. La prueba 5 y 3 pertenecen al límite elástico máximo y mínimo que corresponde a 320.10 y 220.31 MPa. La carga, resistencia y límite elástico promedian 63218.85 N, 515.15 y 287.79 MPa, así también poseen desviaciones estándar de 966.99 N, 7.88 y 34.40 MPa respectivamente.

Tabla 11. Resultados de ensayo a tracción de pernos mecanizados de 1/2 " - 13 UNC

Nro. De pruebas	Carga Máxima [N]	Resistencia máxima a la tracción [MPa]	Límite elástico [MPa]
1	63279.79	515.65	287.79
2	62830.94	511.99	251.76
3	62118.98	506.19	220.31

Continúa...

Nro. De pruebas	Carga Máxima [N]	Resistencia máxima a la tracción [MPa]	Límite elástico [MPa]
4	63398.45	516.62	299.65
5	64933.31	529.12	320.10
6	64182.65	523.01	314.61
7	62144.77	506.40	304.14
8	62861.90	512.24	303.98
Promedio	63218.85	515.15	287.79
Desviación Estándar	966.99	7.88	34.40

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

3.1.4. Perno laminado de 1/2 " - 13 UNC

En la Figura 27 se presenta la curva de esfuerzo vs deformación de una probeta de 1/2 " - 13 UNC laminada, donde el límite de proporcionalidad y de elasticidad oscilan entre 0 y 2 mm y un esfuerzo promedio de 650 MPa, el punto de fluencia se encuentra alrededor de los 2 mm y 600 MPa donde el material se comporta de manera plástica desde los 2 a 8 mm. El esfuerzo último está ubicado en los 5 mm de deformación y oscila entre los 600 y 700 MPa y el perno alcanza la rotura a los 7.5 mm y 550 MPa.

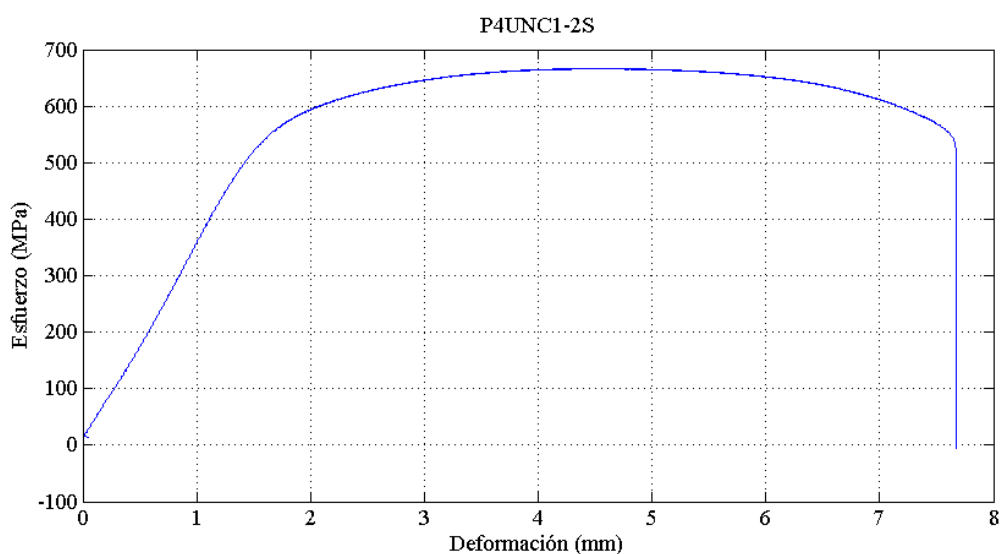


Figura 27. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno de 1/2" - 13 UNC laminado

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

La Tabla 12 detalla los resultados generados en ensayos a tracción realizado a 8 probetas de 1/2 " - 13 UNC laminados, donde los pernos 2 y 7 cuentan con valores mínimos y máximos los cuales son 77462.34 N, 631.22 y 472.92 MPa y 83274.15 N, 678.58 y 528.79 MPa estos datos se encuentran en carga máxima, resistencia máxima a la tracción y límite elástico respectivamente. El promedio y desviación estándar para la carga, resistencia y límite elástico son 80640.39 y 2080.58 N, 657.12 y 16.95 MPa, 497.87 y 17.62 MPa en cada caso.

Tabla 12. Resultados de ensayo a tracción de pernos laminados de 1/2 " – 13 UNC

Nro. De pruebas	Carga Máxima [N]	Resistencia máxima a la tracción [MPa]	Límite elástico [MPa]
1	78783.09	641.98	480.15
2	77462.34	631.22	472.92
3	82211.36	669.92	500.01
4	81754.77	666.20	504.24
5	82551.87	672.69	511.32
6	79397.03	646.99	494.02
7	83274.15	678.58	528.79
8	79688.53	649.36	491.50
Promedio	80640.39	657.12	497.87
Desviación Estándar	2080.58	16.95	17.62

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

3.1.5. Perno mecanizado galvanizado de 1/2 " - 13 UNC

En la Figura 28 se encuentra la curva de esfuerzo vs deformación de una probeta de 1/2 " - 13 UNC mecanizada por arranque de viruta y galvanizada, en el cual la zona elástica se encuentra descrita por una recta desde 0 a 1 mm y de 0 a 300 MPa, el punto de fluencia está ubicado en 1 mm de deformación donde el material adopta un comportamiento plástico alcanzando el esfuerzo último en una deformación de 6 mm

y un esfuerzo de 500 MPa para continuar con el proceso del ensayo hasta llegar a la rotura del elemento en los 8 mm y un esfuerzo promedio de 450 MPa.

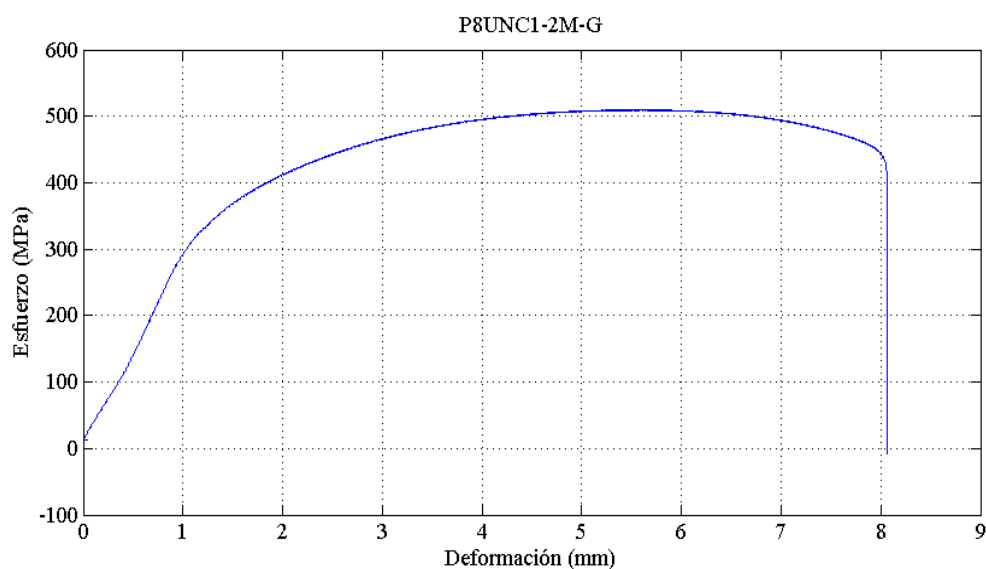


Figura 28. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno de 1/2 " - 13 UNC mecanizado galvanizado

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

Los resultados de los ensayos a tracción realizados en 8 probetas mecanizadas galvanizadas de 1/2 " - 13 UNC se muestran en la Tabla 13 donde la carga máxima y resistencia máxima a la tracción de las probetas 1 y 8 poseen los datos de mayor y menor valor los cuales son 63695.10 N, 519.03 MPa y 62526.55 N, 509.51 MPa respectivamente. El límite elástico máximo y mínimo corresponden a las pruebas 8 y 5 con 310.39 y 296.45 MPa. La carga, resistencia y límite elástico promedian 63111.79 N, 514.28 y 305.01 MPa, así también poseen desviaciones estándar de 366.51 N, 2.99 y 4.80 MPa en cada columna de resultados.

Tabla 13. Resultados de ensayo a tracción de pernos mecanizados galvanizados de 1/2 ” - 13 UNC

Nro. De pruebas	Carga Máxima [N]	Resistencia máxima a la tracción [MPa]	Límite elástico [MPa]
1	63695.10	519.03	304.02
2	63284.95	515.69	309.73
3	63189.50	514.91	301.58
4	62962.50	513.06	309.73
5	62722.60	511.11	296.45
6	63202.40	515.02	304.10
7	63310.74	515.90	304.10
8	62526.55	509.51	310.39
Promedio	63111.79	514.28	305.01
Desviación Estándar	366.51	2.99	4.80

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

3.1.6. Perno laminado galvanizado de 1/2 ” - 13 UNC

La curva de esfuerzo vs deformación de una probeta de 1/2 ” - 13 UNC laminada galvanizada mostrada en la Figura 29, inicia en forma lineal ascendente para encontrar el límite de proporcionalidad y de elasticidad entre 0 y 2 mm y un esfuerzo de 600 MPa, el punto de fluencia se ubica en los 2 mm de deformación y un esfuerzo de 600 MPa. Toda la región plástica transcurre cerca de los 2 y 7 mm con un esfuerzo último y de rotura de 650 MPa en 5 mm y 550 MPa en 7 mm respectivamente.

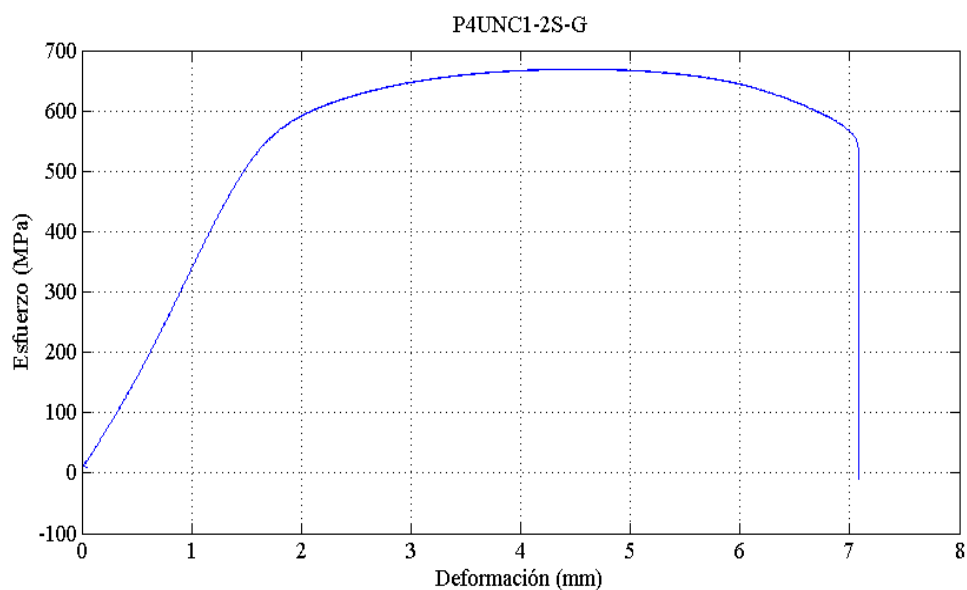


Figura 29. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno de 1/2 " - 13 UNC laminado galvanizado

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

En la Tabla 14 se detalla los resultados de los ensayos a tracción realizado en 8 probetas laminadas galvanizadas de 1/2 " - 13 UNC donde la carga máxima y resistencia máxima a la tracción de mayor y menor valor se encuentran en los pernos 2 y 3 con 82796.92 N, 674.69 MPa y 81824.42 N, 666.77 MPa respectivamente. El límite elástico máximo y mínimo se da en los pernos 7 y 1 que corresponden a 514.26 y 506.59 MPa. El promedio y la desviación estándar de la carga, resistencia y límite elástico son 32428.93 N, 456.71 MPa y 259.94 MPa.

Tabla 14. Resultados de ensayo a tracción de pernos laminados galvanizados de 1/2 " - 13 UNC

Nro. De pruebas	Carga Máxima [N]	Resistencia máxima a la tracción [MPa]	Límite elástico [MPa]
1	82115.92	669.14	506.59
2	82796.92	674.69	510.10
3	81824.42	666.77	506.91
4	82092.70	668.95	508.08
5	82345.49	671.01	509.53

Continúa...

Nro. De pruebas	Carga Máxima [N]	Resistencia máxima a la tracción [MPa]	Límite elástico [MPa]
6	82606.04	673.13	509.01
7	82660.20	673.58	514.26
8	82520.91	672.44	510.16
Promedio	82370.33	671.21	509.33
Desviación Estándar	334.81	2.73	2.41

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

3.1.7. Perno mecanizado M8

En la Figura 30 se observa la curva de Esfuerzo - Deformación de un perno milimétrico M8 obtenido de una varilla corrugada mecanizada, el diagrama muestra varios factores como el límite de fluencia que se encuentra alrededor de los 300 MPa, el esfuerzo de ruptura se ubica en los 395 MPa y una distancia aproximada de 7.85 mm en esas dimensiones el perno sufre una fractura debido a la tracción de la misma, así también el esfuerzo máximo se encuentra alrededor de los 498 MPa y la zona elástica se ubica en el rango de 0 a 0.5 mm.

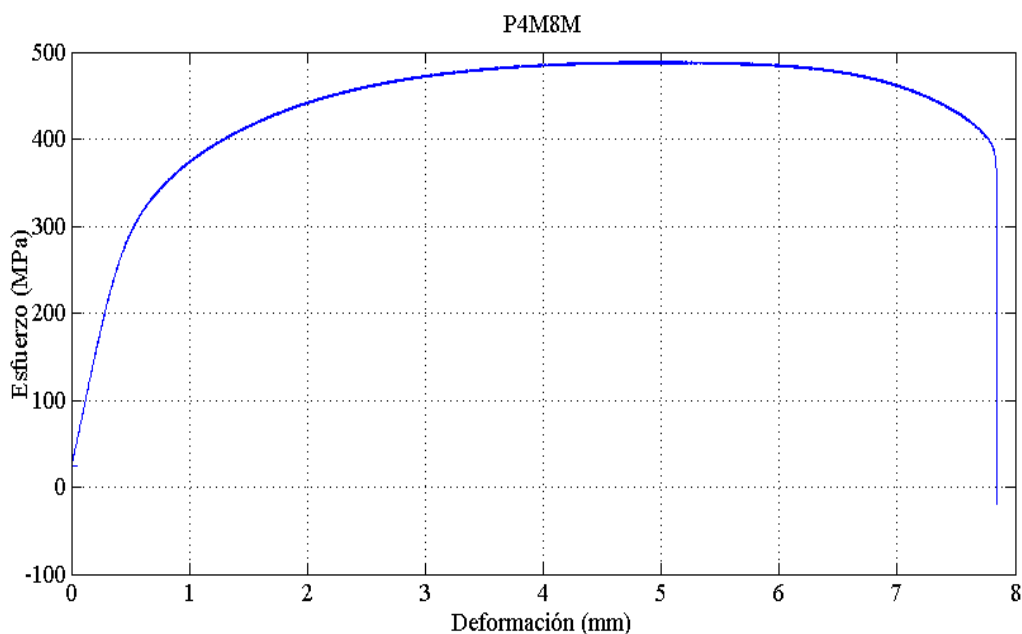


Figura 30. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno M8 mecanizado

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

Los datos de los ensayos a tracción realizados a los pernos M8 mecanizados se aprecian en la Tabla 15 donde se muestra la carga máxima, resistencia máxima a la tracción y límite elástico, sus valores promedios y desviaciones estándar son de 24529.64 y 216.70 N, 487.96 y 4.22 MPa, 281.88 y 5.30 MPa respectivamente, los valores máximos para el límite elástico se obtuvo en la prueba 6 con un valor de 292.16 MPa, para la resistencia máxima a la tracción y carga máxima en la prueba 8 con valores de 24916.61 N y 495.36 MPa respectivamente. Los valores mínimos para el límite elástico corresponden al perno 7 con 274.87 MPa, en la prueba 5 la resistencia máxima a la tracción y carga máxima poseen valores de 24258.41 N y 482.61 MPa.

Tabla 15. Resultados de ensayo a tracción de pernos mecanizados M8

Nro. De pruebas	Carga Máxima [N]	Resistencia máxima a la tracción [MPa]	Límite elástico [MPa]
1	24547.33	488.35	283.08
2	24289.37	483.22	281.59
3	24392.55	485.27	276.56
4	24583.44	489.07	284.87
5	24258.41	482.61	280.10
6	24562.81	488.66	292.16
7	24686.62	491.12	274.87
8	24916.61	495.36	281.79
Promedio	24529.64	487.96	281.88
Desviación Estándar	216.70	4.22	5.30

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

3.1.8. Perno laminado M8

La Figura 31 presenta el diagrama de Esfuerzo - Deformación del perno milimétrico M8 basada en la Norma ISO 4017 la cual se obtuvo en el mercado industrial, la curva presenta factores como límite de fluencia, esfuerzo de ruptura y esfuerzo máximo con valores aproximados de 520, 430 y 615 MPa respectivamente, también se obtuvo valores como la distancia a la que el perno sufre la ruptura la cual es de 4.4 mm y la zona elástica que se encuentra en el rango de 0 a 0.7 mm.

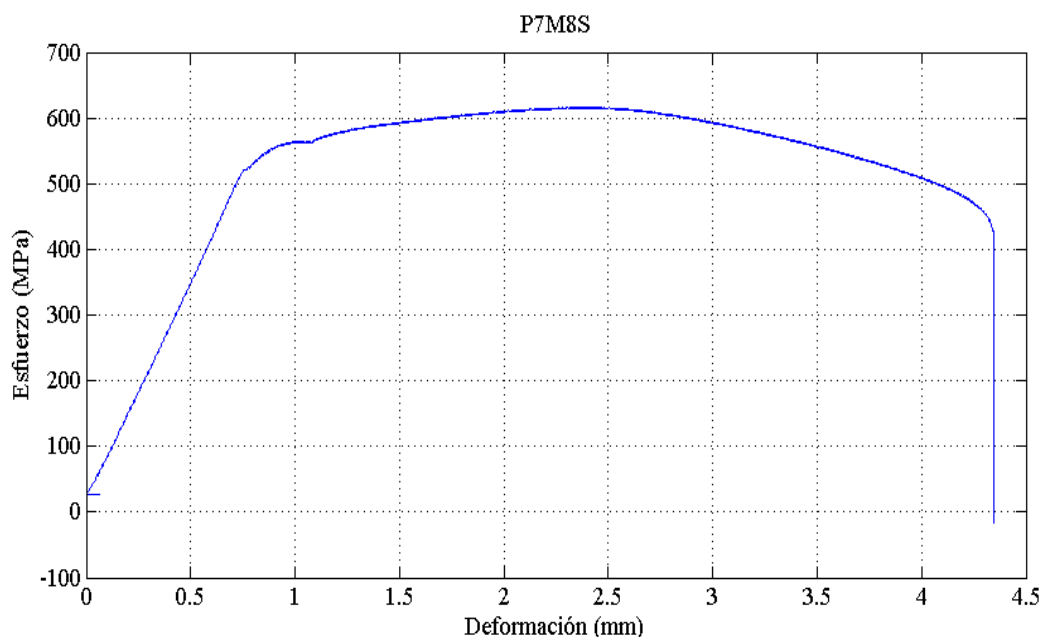


Figura 31. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno M8 laminado

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

La Tabla 16 muestra los datos obtenidos de los ensayos a tensión a los cuales se sometieron los pernos M8 sin mecanizar o laminados, los valores promedios y desviaciones estándar son de 32162.14 y 1754 N para carga máxima, 639.08 y 34.70 MPa para resistencia máxima a la tracción, 564.79 y 20.32 MPa para el límite elástico, los valores máximos se obtuvieron en el ensayo de la probeta 8 el cual arrojo datos de 36219.01 N, 720.06 y 601.31 MPa, de carga máxima, resistencia a la tracción y límite elástico respectivamente. Así también la probeta 5 presenta valores mínimos de 30730.59 N, 611.37 y 539.83 MPa en el mismo orden de ideas.

Tabla 16. Resultados de ensayo a tracción de pernos laminados M8

Nro. De pruebas	Carga Máxima [N]	Resistencia máxima a la tracción [MPa]	Límite elástico [MPa]
1	31308.42	622.86	550.35
2	32262.86	641.85	577.08
3	31930.10	635.23	560.76
4	32538.88	647.34	579.03

Continúa...

Nro. De pruebas	Carga Máxima [N]	Resistencia máxima a la tracción [MPa]	Límite elástico [MPa]
5	30730.59	611.37	539.83
6	31311.00	622.91	564.00
7	30996.29	616.65	545.98
8	36219.01	720.06	601.31
Promedio	32162.14	639.08	564.79
Desviación Estándar	1754	34.70	20.32

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

3.1.9. Perno mecanizado galvanizado M8

En la Figura 32 se muestra la curva de Esfuerzo - Deformación de un perno milimétrico M8 mecanizado sometido a un proceso químico de galvanizado tropicalizado, el límite de fluencia, esfuerzo de ruptura y esfuerzo máximo son algunos de los factores que presenta la curva con valores aproximados de 292, 400 y 485 MPa respectivamente se aprecia que la zona elástica se encuentra en el rango de 0 a 0.45 mm y la distancia a la que el perno sufre su fractura es de alrededor de 8 mm.

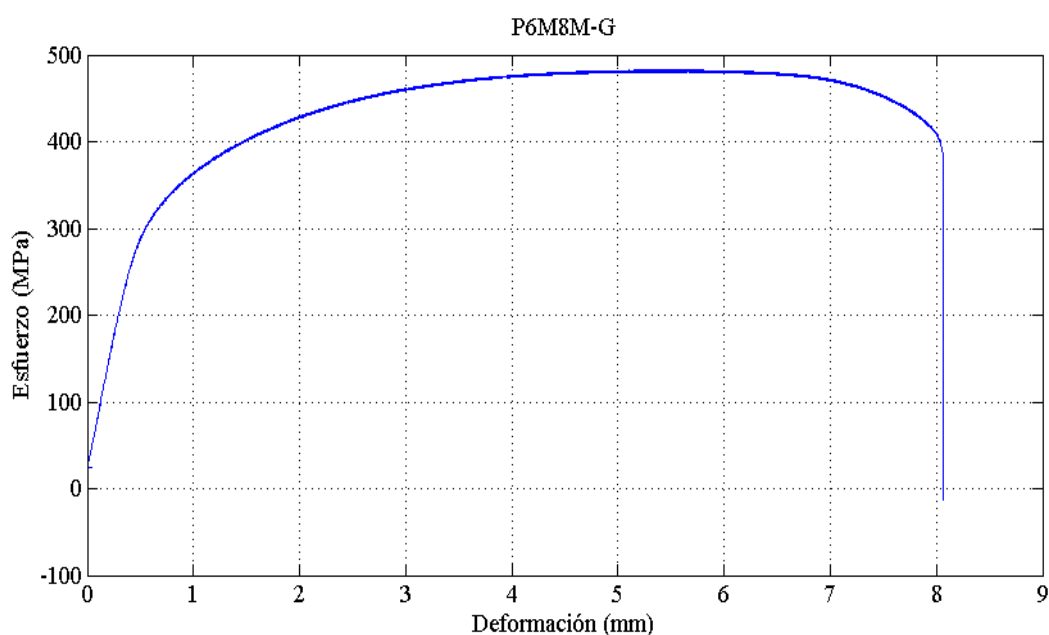


Figura 32. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno M8 mecanizado galvanizado

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

La Tabla 17 presenta valores promedios y desviación estándar de carga máxima, resistencia máxima a la tracción y límite elástico de 24206.08 y 197.77 N, 481.56 y 3.93 MPa, 275.33 y 6.38 MPa respectivamente, la probeta 7 presentó resultados máximos de 24472.52 N y 486.87 MPa en carga máxima y resistencia máxima a la tracción mientras que el límite elástico arroja su valor máximo en la prueba 6 con 288.31 MPa, los datos mínimos se presentaron en la probeta 1 para la carga máxima y resistencia máxima a la tracción con valores de 23917.91 N y 475.83 MPa y en la prueba 4 se da el valor mínimo de los 8 ensayos con 269.48 MPa.

Tabla 17. Resultados de ensayo a tracción de pernos M8 mecanizados galvanizados

Nro. De pruebas	Carga Máxima [N]	Resistencia máxima a la tracción [MPa]	Límite elástico [MPa]
1	23917.91	475.83	271.53
2	24235.20	482.14	280.20
3	24093.32	479.32	275.33
4	24005.62	477.58	269.48
5	24457.04	486.56	276.20
6	24260.99	482.66	288.31
7	24472.52	486.87	271.84
8	24206.08	481.56	269.73
Promedio	24206.08	481.56	275.33
Desviación Estándar	197.77	3.93	6.38

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

3.1.10. Perno laminado galvanizado M8

Del diagrama Esfuerzo - Deformación mostrado en la Figura 33 se obtuvo datos como el límite de fluencia que se encuentra alrededor de 560 MPa, el esfuerzo de ruptura ubicado en los 480 MPa de la curva, el perno sufre la ruptura total al deformarse 5.4 mm aproximadamente, también el esfuerzo máximo aproximado es de 640 MPa y la zona elástica se encuentra entre 0 y 0.8 mm. Esta curva pertenece a un perno M8

obtenido en el mercado industrial el cual se basa en la Norma ISO 4017 y fue sometido a un proceso químico de galvanizado tropicalizado.

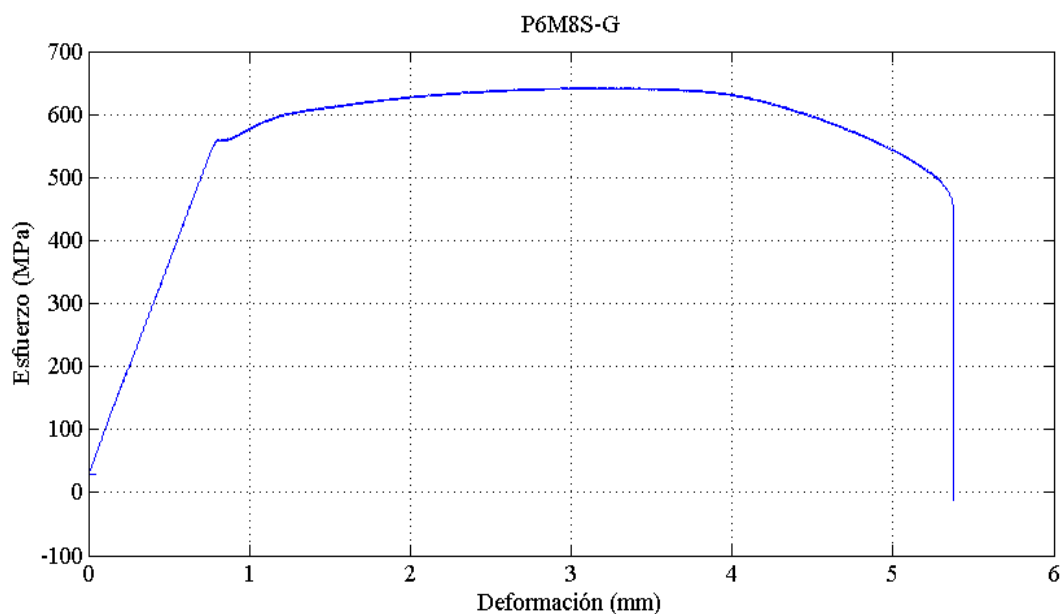


Figura 33. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno M8 laminado galvanizado

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

Los resultados de los ensayos a tracción realizados en 8 pernos M8 laminados con recubrimiento por galvanizado tropicalizado se aprecian en la Tabla 18 donde la carga máxima, resistencia máxima a la tracción y límite elástico presentan valores promedios y de desviación estándar de 31780.80 y 1567.49 N, 632.26 y 42.20 MPa, 555.84 y 27.79 MPa respectivamente, los datos máximos se obtuvieron en la prueba 7 con valores de 34133.06 N, 722.06 y 600.43 MPa mientras que en la prueba 3 los datos mínimos fueron de 29879.33 N, 594.43 y 512.01 MPa.

Tabla 18. Resultados de ensayo a tracción de pernos M8 laminados galvanizados

Nro. De pruebas	Carga Máxima [N]	Resistencia máxima a la tracción [MPa]	Límite elástico [MPa]
1	32595.63	648.47	569.03
2	30320.44	603.21	531.67

Continúa...

Nro. De pruebas	Carga Máxima [N]	Resistencia máxima a la tracción [MPa]	Límite elástico [MPa]
3	29879.33	594.43	512.01
4	30642.89	609.62	539.16
5	33488.17	666.23	576.83
6	32291.24	642.41	558.25
7	34133.06	722.06	600.43
8	30895.68	614.65	559.38
Promedio	31780.80	637.60	555.84
Desviación Estándar	1567.49	42.20	27.79

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

3.1.11. Perno mecanizado M10

La Figura 34 presenta la curva de Esfuerzo - Deformación de un perno milimétrico M10 mecanizado a partir de una varilla corrugada de 14 mm de diámetro, donde se obtuvo datos relevantes para la investigación, estos fueron el límite de fluencia, esfuerzo de ruptura y el esfuerzo máximo con valores aproximados de 290, 400 y 500 MPa respectivamente, además se obtuvo la distancia de deformación a la que el perno sufre la ruptura la cual es de 9.4 mm aproximadamente, así también en la curva se identifica la zona elástica que se encuentra en el rango de 0 a 0.7 mm.

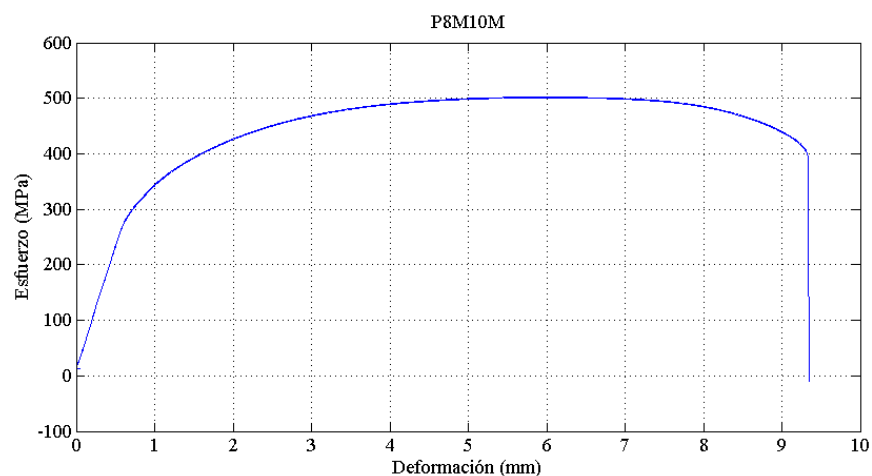


Figura 34. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno M10 mecanizado

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

La Tabla 19 detalla los datos obtenidos de los ensayos a tensión realizados a los pernos M10 mecanizados por arranque de viruta, los valores promedios y desviación estándar son de 39438.30 y 290.82 N para carga máxima, 502.14 y 3.70 MPa para resistencia máxima a la tracción, 291.71 y 9.48 MPa para el límite elástico, los valores máximos se obtuvieron en el ensayo de la probeta 2 el cual arroja datos de 39846.84 N y 507.35 MPa en carga máxima y resistencia a la tracción respectivamente, el límite elástico cuenta con 299.90 MPa como valor máximo y se encuentra en la probeta 7. Los valores mínimos de los ensayos a tensión se dan en la probeta 5 con 38982.68 N y 496.34 MPa para carga y resistencias máximas a la tracción, sin embargo, para el límite elástico el valor mínimo se encuentra en la prueba 6 con 270.51 MPa.

Tabla 19. Resultados de ensayo a tracción de pernos M10 mecanizados

Nro. De pruebas	Carga Máxima [N]	Resistencia máxima a la tracción [MPa]	Límite elástico [MPa]
1	39612.10	504.35	286.60
2	39846.84	507.35	298.62
3	39782.35	506.52	296.32
4	39312.87	500.55	292.94
5	38982.68	496.34	295.17
6	39336.09	500.84	270.51
7	39235.48	499.56	299.90
8	39398.00	501.63	293.60
Promedio	39438.30	502.14	291.71
Desviación Estándar	290.82	3.70	9.48

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

3.1.12. Perno laminado M10

De la curva Esfuerzo - Deformación se aprecia en la Figura 35 generada del ensayo a tracción de un perno milimétrico M10 laminado, el límite de fluencia, esfuerzo de ruptura, esfuerzo máximo se encuentran en valores aproximados de 602, 510 y 710 MPa respectivamente, además se observa que la zona elástica se

encuentra en el rango de 0 - 1.2 mm y la distancia a la que el perno se deforma para fracturarse es de 6.15 mm aproximadamente.

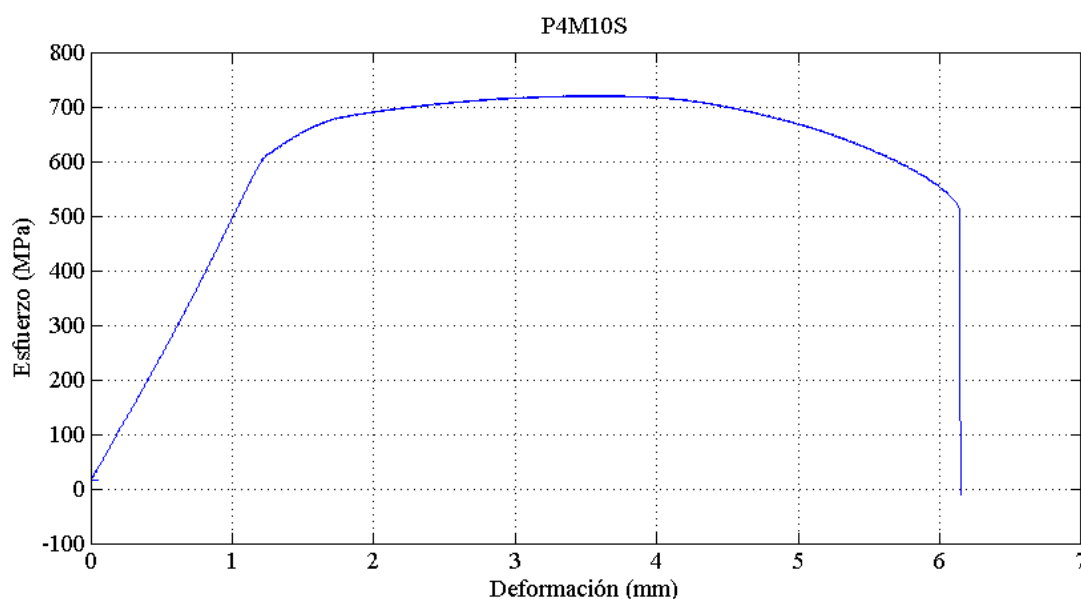


Figura 35. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno M10 laminado

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

En la Tabla 20 se observan valores promedios y desviación estándar para la carga máxima, resistencia máxima a la tracción y límite elástico con magnitudes de 56534.50 y 341.09 N, 719.82 y 4.34 MPa, 622.07 y 4.24 MPa respectivamente, la probeta 8 presentó los resultados máximos entre los 8 ensayos donde la carga máxima, resistencia máxima a la tracción y límite elástico cuentan con valores de 57037.19 N, 726.22 y 627.03 MPa en cada caso. La prueba 1 presenta los valores de menor magnitud entre los ensayos realizados a los pernos M10 prefabricados con 56144.66 N para carga máxima, 714.86 MPa para resistencia máxima a la tracción y 616.59 MPa para el límite elástico.

Tabla 20. Resultados de ensayo a tracción de pernos M10 laminados

Nro. De pruebas	Carga Máxima [N]	Resistencia máxima a la tracción [MPa]	Límite elástico [MPa]
1	56144.66	714.86	616.59
2	56737.97	722.41	625.03
3	56154.98	714.99	617.67
4	56518.70	719.62	623.29
5	56394.88	718.04	622.27
6	56343.29	717.38	617.77
7	56944.33	725.04	626.90
8	57037.19	726.22	627.03
Promedio	56534.50	719.82	622.07
Desviación Estándar	341.09	4.34	4.24

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

3.1.13. Perno mecanizado galvanizado M10

En la Figura 36 se observa la curva de Esfuerzo - Deformación del ensayo a tracción sometido a un perno milimétrico M10 mecanizado el cual fue sometido a un proceso químico de galvanizado tropicalizado, la curva presenta datos de límite de fluencia que se encuentra alrededor de 290 MPa, esfuerzo de ruptura ubicado en los 385 MPa, además el perno sufre la ruptura a la deformación de los 9.7 mm aproximadamente, así también el esfuerzo máximo aproximado es de 498 MPa y la zona elástica se encuentra entre 0 y 0.75 mm.

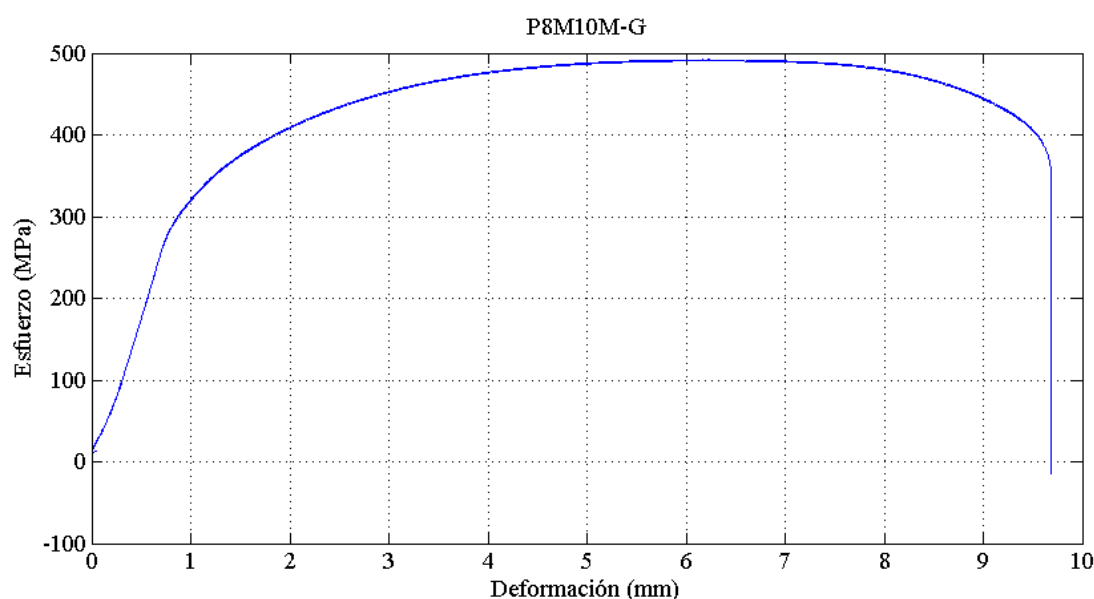


Figura 36. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno M10 mecanizado galvanizado

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

Los datos promedios de los ensayos realizados a los pernos M10 mecanizados con tratamiento químico de galvanizado tropicalizado se detallan en la Tabla 21 mostrando la carga máxima, resistencia máxima a la tracción y límite elástico con valores de 38259.11 N, 487.13 y 300.08 MPa respectivamente, la desviación estándar en cada caso es de 2170.02 N, 23.80 y 5.45 MPa. El valor máximo para el límite elástico se ubica en la prueba 7 con un valor de 303.51 MPa, para la carga y resistencia máximas a la tracción los valores más altos se encuentran en la prueba 5 con valores de 39877.80 N y 507.74 MPa respectivamente. Sin embargo, las probetas 1 y 3 presentan valores mínimos de 33008.36 N, 420.27 y 288.01 MPa en carga, resistencia y límite elástico en cada caso.

Tabla 21. Resultados de ensayo a tracción de pernos M10 mecanizados galvanizados

Nro. De pruebas	Carga Máxima [N]	Resistencia máxima a la tracción [MPa]	Límite elástico [MPa]
1	33008.36	420.27	302.17
2	38791.79	493.91	298.78

Continúa...

Nro. De pruebas	Carga Máxima [N]	Resistencia máxima a la tracción [MPa]	Límite elástico [MPa]
3	38804.69	494.08	288.01
4	39320.61	500.65	303.45
5	39877.80	507.74	305.75
6	38456.45	489.64	299.18
7	39212.27	499.27	299.80
8	38600.90	491.48	303.51
Promedio	38259.11	487.13	300.08
Desviación Estándar	2170.02	23.80	5.45

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

3.1.14. Perno laminado galvanizado M10

En la Figura 37 se observa la curva de Esfuerzo – Deformación de un perno milimétrico M10 obtenida en el mercado industrial el cual se basa en la Norma ISO 4017 además la probeta fue sometida al proceso químico de galvanizado tropicalizado, la curva del perno posee su límite de fluencia alrededor de los 620 MPa, el esfuerzo de ruptura en los 520 MPa, la distancia de 6.2 mm aproximadamente es la deformación donde el perno sufre la ruptura, también el esfuerzo máximo aproximado es de 730 MPa y la zona elástica se ubica entre 0 y 1.25 mm.

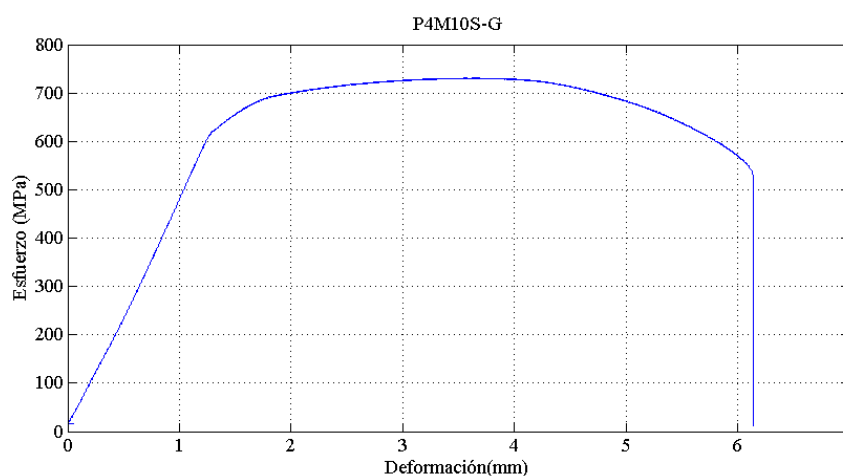


Figura 37. Diagrama esfuerzo vs deformación de un perno M10 laminado galvanizado

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

La Tabla 22 muestra los datos obtenidos de los ensayos a tensión realizados a los pernos M10 laminados recubiertos por un galvanizado tropicalizado, los valores promedio y de desviación estándar son de 56296.21 y 704.92 N para carga máxima, 716.79 y 8.98 MPa para resistencia máxima a la tracción, 619.05 y 10.33 MPa en límite elástico. Los valores máximos se encuentran en el ensayo 3 con 57344.17 N, 730.13 y 633.96 MPa que corresponden a la carga máxima, resistencia a la tracción y límite elástico respectivamente. Los valores mínimos en el mismo orden de ideas se encuentran en las probetas 1 y 5 con magnitudes de 55636.48 N, 708.39 y 603.91 MPa.

Tabla 22. Resultados de ensayo a tracción de pernos M10 laminados galvanizados.

Nro. De pruebas	Carga Máxima [N]	Resistencia máxima a la tracción [MPa]	Límite elástico [MPa]
1	55636.48	708.39	609.95
2	56926.27	724.81	627.56
3	56874.68	724.15	626.21
4	57344.17	730.13	633.96
5	55414.64	705.56	603.91
6	55641.64	708.45	609.89
7	56211.73	715.71	619.61
8	56320.07	717.09	621.28
Promedio	56296.21	716.79	619.05
Desviación Estándar	704.92	8.98	10.33

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

3.2. Análisis de resultados

3.2.1. Análisis comparativo de probetas de 3/8 ” - 16 UNC

En el presente estudio se muestra en la Figura 38 un diagrama esfuerzo - deformación de dos pernos de 3/8 ” - 16 UNC mecanizados galvanizados y sin galvanizar que poseen material, propiedades físicas y químicas similares, la curva de color rojo representa al perno mecanizado sin recubrimiento mientras que la curva de color verde

detalla el ensayo de un perno mecanizado galvanizado. La diferencia entre estos dos pernos se da en el límite de proporcionalidad y elástico que poseen un esfuerzo aproximado similar que oscila entre 200 y 300 MPa, la probeta sin galvanizado alcanza el punto de fluencia en una deformación menor que la probeta galvanizada es decir el tiempo en que transcurre la zona elástica del perno sin galvanizar es menor que el perno galvanizado.

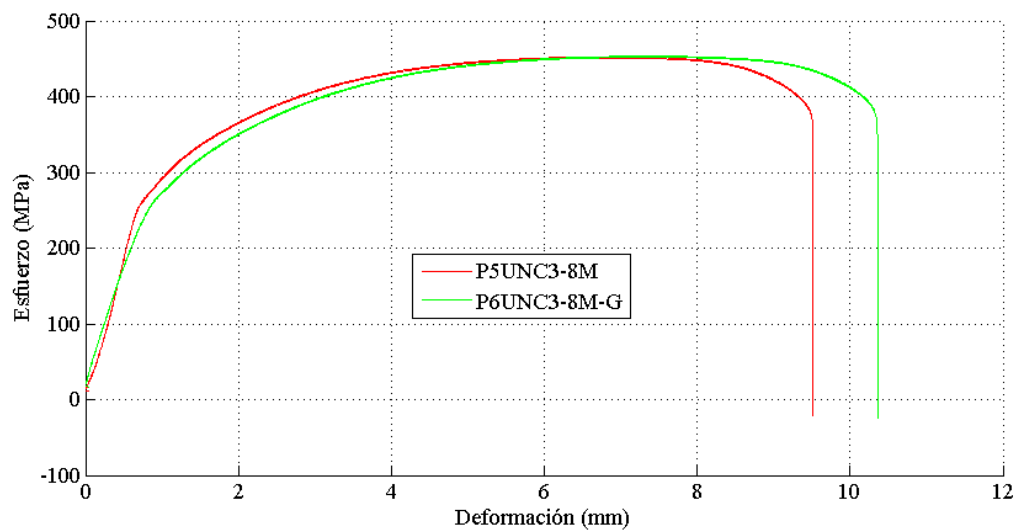


Figura 38. Diagrama esfuerzo vs deformación de pernos mecanizados galvanizados y sin galvanizar de 3/8 ”

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

Así también en la Figura 38 se presenta la diferencia más representativa entre los dos pernos de 3/8 ” que es el punto de rotura donde el perno galvanizado posee una deformación mayor que el perno sin galvanizar antes de fracturarse, sin embargo el perno sin recubrimiento posee una carga máxima de 35184.60 N, resistencia a la tracción de 496.26 MPa y límite elástico de 271.56 MPa los cuales son valores de mayor magnitud que el perno galvanizado con resultados máximos de 32492.45 N, 458.40 y 250.38 MPa respectivamente, de este modo se determina que la probeta sin recubrimiento posee una resistencia a la tracción superior que la probeta galvanizada debido a fallas en el espesor de recubrimiento.

3.2.2. Análisis comparativo de probetas de 1/2 " - 13 UNC

La Figura 39 presenta los diagramas esfuerzo - deformación de 4 pernos de 1/2 " – 13 UNC y cuenta con 4 curvas que son de color roja, verde, celeste y amarilla que representan a un perno mecanizado, un perno laminado, un perno mecanizado galvanizado y un perno laminado galvanizado respectivamente. La similitud entre los 4 ensayos se da únicamente en el ascenso de las curvas hasta los 300 MPa aproximadamente, los límites de proporcionalidad y elástico, el punto de fluencia y los esfuerzos último y de ruptura de los pernos sin mecanizar presentan una magnitud superior entre 150 y 300 MPa de diferencia ante los pernos mecanizados.

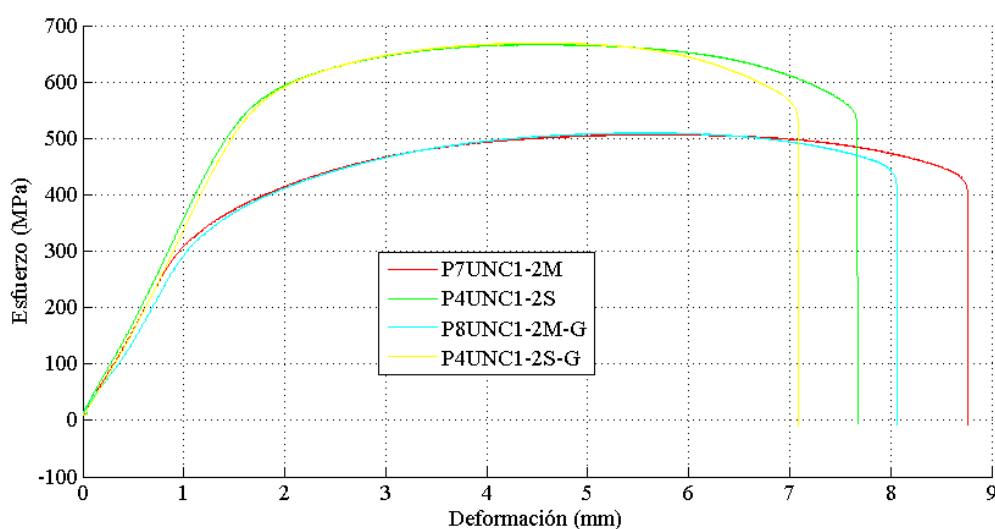


Figura 39. Diagrama esfuerzo vs deformación de pernos mecanizados y laminados galvanizados y sin galvanizar de 1/2 "

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

Los pernos mecanizados galvanizados y sin galvanizar al ser fabricados por el mismo material poseen esfuerzos similares en toda la trayectoria del ensayo con una diferencia en carga máxima, resistencia a la tracción y límite elástico a favor del perno mecanizado sin galvanizar de 1238.21 N, 10.09 y 9.71 MPa respectivamente, además que la magnitud de la deformación en el punto de rotura es mayor de 8.5 mm para la probeta sin galvanizar y la probeta galvanizada oscila entre 8 y 8.5 mm, esto demuestra que el perno maquinado sin galvanizado de 1/2 " posee mayor resistencia a la tracción que el perno mecanizado galvanizado.

Así también los 2 pernos laminados de 1/2 " uno galvanizado y otro sin galvanizar adquieren esfuerzos semejantes en toda su trayectoria debido a poseer el mismo material. Sin embargo, el perno laminado galvanizado posee una diferencia de carga máxima, resistencia a la tracción y límite elástico mayor que el perno laminado sin recubrimiento con valores de 5334.58 N, 43.47 y 41.34 MPa en cada caso. Por lo tanto, en este caso el perno laminado galvanizado posee mayor resistencia a la tracción que el perno laminado sin galvanizar a pesar de que existe una diferencia de deformación de 0.5 mm aproximadamente.

El perno laminado sin recubrimiento, aunque se deforma menos que el perno mecanizado sin galvanizado posee mayor resistencia a la tracción debido a que la probeta laminada presenta valores de esfuerzo en límites de proporcionalidad y elástico, punto de fluencia, esfuerzos últimos y de rotura mayores que del perno maquinado sin galvanizar con una diferencia que oscila entre 150 y 250 MPa. Este caso expuesto se da de manera similar entre el perno mecanizado galvanizado y el perno laminado galvanizado. Además, el perno laminado galvanizado al ser el elemento de mayor influencia presenta valores de 82796.92 N, 674.69 y 514.26 MPa para carga máxima, resistencia máxima a la tracción y límite elástico respectivamente. Por lo tanto, en el orden de ideas propuestas con anterioridad se presenta los 4 pernos de 1/2 " ensayados en orden descendente de mayor a menor resistencia a tensión iniciando con el perno laminado galvanizado, seguido por el perno laminado sin galvanizar, en tercer lugar se encuentra el perno mecanizado sin galvanizar y finalmente el perno maquinado galvanizado.

3.2.3. Análisis comparativo de probetas M8

En el ensayo de los pernos M8 se obtuvo los diagramas esfuerzo – deformación de la Figura 40 donde las curvas de color rojo, verde, celeste y amarillo representan las probetas mecanizada, laminada, maquinada galvanizada y laminada galvanizada respectivamente. El perno mecanizado galvanizado tiene una deformación mayor a 10 mm siendo la probeta M8 de mayor elongación entre los 4 diferentes ensayos a tracción, mientras que el perno laminado galvanizado posee un esfuerzo último mayor a 600 MPa.

El perno laminado galvanizado posee una carga máxima de 34133.06 N, una resistencia máxima a la tracción de 722.06 MPa y un límite elástico de 600.43 MPa siendo la probeta de mayor influencia y beneficio para estructuras metálicas debido a que es el elemento que posee los valores más altos entre los 4 diferentes tipos de pernos, puesto que el perno mecanizado sin galvanizar arroja valores de 24916.61 N, 495.36 y 292.16 MPa, el perno mecanizado galvanizado posee resultados de 24472.52 N, 486.87 y 288.31 MPa y el perno laminado sin galvanizar tiene valores de 36219.01 N, 720.06 y 601.31 MPa.

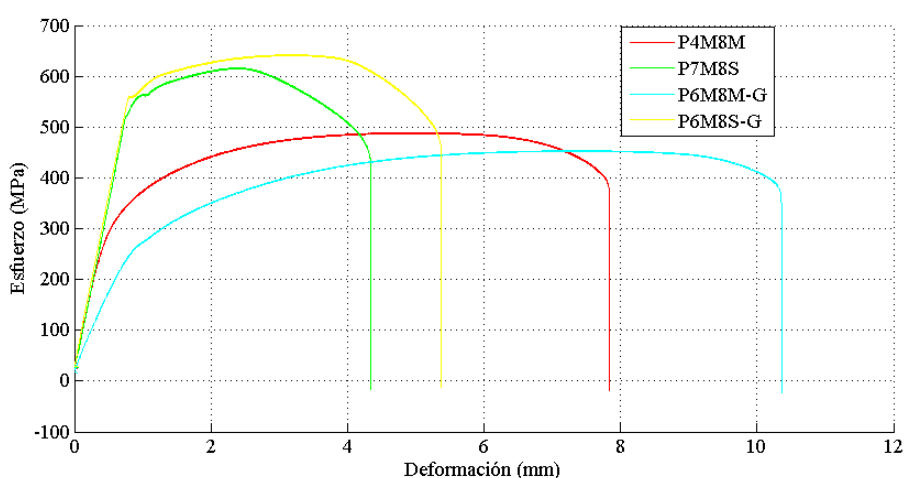


Figura 40. Diagrama esfuerzo vs deformación de pernos mecanizados y laminados galvanizados y sin galvanizar de M8

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

De acuerdo con la probeta de mayor carga máxima, resistencia máxima a la tracción, esfuerzo límite y deformación de perno, en ese orden de ideas se especifica de menor a mayor resistencia a la tracción los pernos de anclaje M8 iniciando por la probeta mecanizada galvanizada, seguido por la probeta maquinada sin galvanizar, a continuación sigue la probeta laminada sin galvanizar y siendo la probeta laminada galvanizada el perno más resistente entre los ensayos a tracción de los pernos de anclaje M8.

3.2.4. Análisis comparativo de probetas M10

Los pernos M10 al ser sometidos a varios ensayos de tracción se obtuvieron 4 curvas de color rojo, verde, celeste y amarillo mostradas en la Figura 41 y representan a un

perno mecanizado, perno laminado, perno mecanizado galvanizado y perno laminado galvanizado respectivamente. Los pernos mecanizados galvanizados y sin galvanizar poseen mayor deformación en su longitud que los pernos laminados galvanizados y sin galvanizar, sin embargo, las probetas laminadas con recubrimiento y sin recubrimiento poseen esfuerzos últimos y de rotura mayores que las probetas maquinadas galvanizadas y sin galvanizar. En este caso los ensayos a tracción entre las probetas laminadas galvanizadas y sin galvanizar poseen la misma deformación en el punto de rotura, aunque el esfuerzo de 720 MPa corresponde al perno laminado galvanizado.

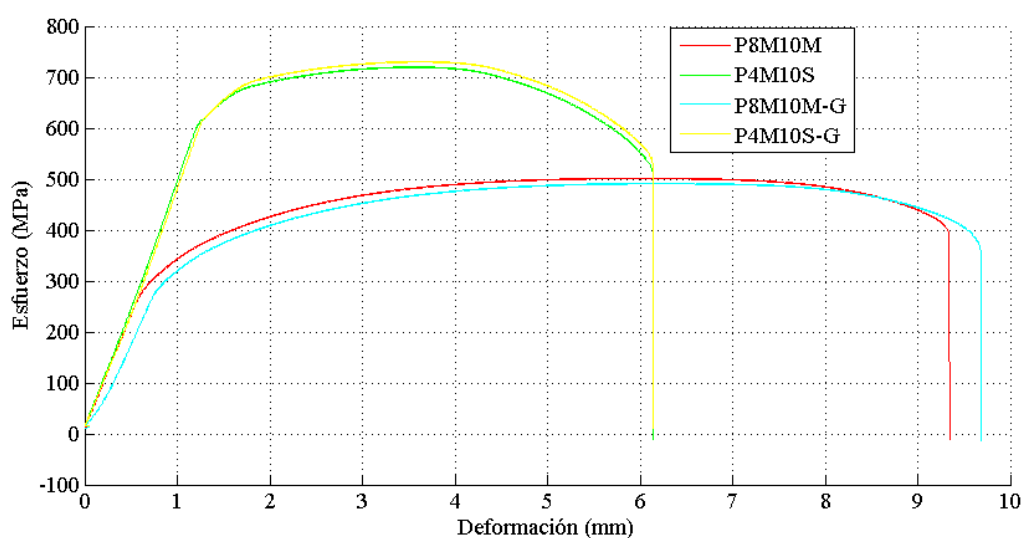


Figura 41. Diagrama esfuerzo vs deformación de pernos mecanizados y laminados galvanizados y sin galvanizar de M10

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

El perno M10 laminado galvanizado posee valores de 57344.17 N, 730.13 y 633.96 MPa siendo el elemento de mayor carga máxima, resistencia a la tracción y límite elástico con respectivamente, el perno laminado sin galvanizar arroja resultados de 57037.19 N, 726.22 y 627.03 MPa, el perno mecanizado galvanizado tiene 39877.80 N, 507.74 y 303.51 MPa y el perno mecanizado sin galvanizar posee 39846.84 N, 507.35 y 299.90 MPa. A partir de los datos expuestos con anterioridad se muestra que el perno laminado galvanizado es la probeta de mayor resistencia a tracción entre los 4 tipos de pernos de M10, el perno laminado sin galvanizar es el segundo perno de mayor resistencia seguido por el perno mecanizado galvanizado y

por último el perno mecanizado sin galvanizar es la probeta de menor resistencia a tracción entre los pernos de anclaje M10.

La Tabla 23 presenta el error porcentual de la resistencia a tracción de los pernos de anclaje utilizados en este estudio con la finalidad de mostrar la confiabilidad de los ensayos a tracción realizados en el laboratorio con respecto a las especificaciones sugeridas en los diferentes catálogos propuestos en el mercado industrial los cuales se encuentran en el Anexo C. Los valores experimentales son menores a las magnitudes teóricas debido a que las probetas mecanizadas y laminadas fueron modificadas para ser adaptadas a la máquina universal generando rebabas que ocasionan concentraciones de esfuerzos. Es por este motivo que los pernos experimentales presentan una menor resistencia a la tracción.

Tabla 23. Error porcentual de resistencia a la tracción

Probetas de estudio	Valor teórico [MPa]	Valor experimental [MPa]	Error [%]
Perno 3/8 " mecanizado	550	496.26	9.77
Perno 1/2 " mecanizado	550	529.12	3.80
Perno 1/2 " laminado	689.47	678.58	1.58
Perno M8 mecanizado	550	495.36	9.93
Perno M8 laminado	800	720.06	9.99
Perno M10 mecanizado	550	507.35	7.75
Perno M10 laminado	800	726.22	9.22

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

En la Tabla 24 se presenta la comparación porcentual entre la materia prima utilizada en las probetas M8, M10 y 1/2 " – 13 UNC, este proceso se obtiene a través de los valores máximos recolectados en la experimentación de ensayos a tracción. Para los pernos M8 y M10 se utilizaron dos tipos de materiales, el acero ISO 4140 y el acero ASTM A 706 los cuales presentaron una diferencia porcentual a favor del acero ISO 4140 de 32.38, 30.80 y 52.05, 51.59 % para resistencia a la tracción y limite elástico

respectivamente. Sin embargo, el acero ASTM A 706 posee una deformación porcentual superior de 53.33 y 51.21 para los pernos M8 y M10 en cada caso.

Tabla 24. Diferencia porcentual entre materia prima de probetas

Tipo de perno	Material	Resistencia		
		a la tracción [%]	Límite Elastico [%]	Deformación [%]
M8	Acero ISO 4140			
	Acero ASTM A 706	32.38	52.05	53.33
M10	Acero ISO 4140			
	Acero ASTM A 706	30.80	51.59	51.21
1/2 " - 13 UNC	Acero ASTM A 193-B7			
	Acero ASTM A 706	22.03	39.45	14.29

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

Para el perno de 1/2 " - 13UNC también se usaron dos tipos de materiales, el acero ASTM A 193 grado B7 y el acero ASTM A 706, estos tipos de acero generaron una diferencia porcentual inclinada hacia el acero ASTM A193 B7 con un valor de 22.03 y 39.45 % para resistencia a la tracción y limite elástico respectivamente. El acero ASTM A 706 presenta una mayor deformación que el acero ASTM 193 B7 con un valor de 14.29 %. Debido a los resultados porcentuales obtenidos en la Tabla 24 se demuestra que el acero ISO 4140 es el material de mejor calidad y el acero ASTM A 706 es el material menos apropiado para ser utilizados en estructuras metálicas.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE COSTOS

4.1.1. Gastos de obtención de probetas

El presente capítulo muestra el costo total en forma detallada sobre la obtención de pernos laminados, fabricación por arranque de viruta de pernos de anclaje y galvanización de probetas. La Tabla 25 detalla el costo de cada perno laminado utilizado en los ensayos a tracción, además de mostrar la empresa donde se realizó la adquisición de los elementos, la cantidad, el tipo de producto con sus respectivas especificaciones y el valor total entre materia prima y pernos laminados.

Tabla 25. Gastos de materia prima y pernos laminados

Empresa	Cantidad	Producto	Costo [USD]
	1	Perno Hexagonal G8 UNC 3/8 X 2	0.33
	1	Perno Hexagonal G8 UNC 1/2 X 2	0.57
	1	Perno Hexagonal MM 8.8 NEGRO 8 X 1.25 X 50	0.18
	1	Perno Hexagonal MM 8.8 NEGRO 10 X 1.50 X 50	0.34
GlobalPernos	1	Espárrago M10 X 1.25 X 1.25 X 40 M	0.55
	1	Espárrago M8 X 1.25 X 50	0.45
	1	Espárrago MIXTO 1/2 X 2' (50.8) UNC·UNF	2.00
	1	Espárrago MIXTO 3/8 X 1 1/2' (28.5) UNC·UNF	0.48
	-	IVA	0.59
Disensa	1	Varilla corrugada Novacero 14	13.83
	1	Varilla roscada 1/2 - 13 UNC	21.84
Castillo	12	Perno con tuerca 1/2, 3/8, M8, M10	4.65
Hermanos	20	Perno M10 grado 8.8	8.00
	17	Perno M8 grado 8.8	5.00

Continúa...

Empresa	Cantidad	Producto	Costo [USD]
Ivan	1	Acero 709 de la Norma AISI	8.00
Bohman		4140 50x200 mm	
Ferretería	3	Perno M8 grado 8.8 galvanizado	3.00
Total [USD]			69.81

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

La Tabla 26 presenta las empresas donde se fabricaron y se galvanizaron los pernos de anclaje obtenidos a partir de mecanizado por arranque de viruta, además muestra la cantidad de pernos fabricados y su respectiva descripción, también detalla los gastos de fabricación de los diferentes tipos de probetas que incluye los procesos de cilindrado, roscado y corte. Por último, se presenta el costo de galvanizado tropicalizado y el total de costos entre fabricación y galvanización.

Tabla 26. Gastos de fabricación de probetas y galvanizado

Empresa	Cantidad	Descripción	Costo [USD]
Inmeceimc	20	Fabricación de rosca M8 X 1.25 en varilla corrugada	80.00
	20	Fabricación de rosca M10 X 1.50 en varilla corrugada	60.00
	20	Fabricación de rosca de 3/8 - 16 UNC en varilla corrugada	60.00
	20	Fabricación de rosca de 1/2 - 13 UNC en varilla corrugada	60.00
	60	Cortes de perno M8, M10 y varilla roscada	30.00
	1	Fabricación de accesorio de 1/2" para máquina universal.	25.00
Dionisio			
Cromados y Pintados	66	Galvanizado tropicalizado de pernos	20.00
Total [USD]			310.00

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

En el presente estudio se realizó un proceso de galvanizado tropicalizado en 66 pernos de varios diámetros los cuales fueron de 8 y 10 mm, 1/2 y 3/8 " con un costo total de 20 USD, es decir que cada probeta posee un costo por recubrimiento de 30 ctvs. Los pernos milimétricos M10 en el mercado industrial cuentan con un valor unitario de 0.40 ctvs, al utilizar 20 probetas, 10 sin galvanizar y 10 galvanizadas el costo total en cada caso es de 4 y 7 USD. Por lo cual presentan una diferencia porcentual en costo del 75 %.

Al referirse a los pernos fabricados a partir de la varilla corrugada. El costo de cada perno es de 3 USD donde incluye el proceso de torneado, roscado y corte. El total de los pernos mecanizados M10 en probetas galvanizadas es de 33 USD y en probetas sin galvanizar de 30 USD con una diferencia en costos del 10 %. Según el análisis expuesto los pernos galvanizados son los elementos de mayor confiabilidad para estructuras metálicas debido a que poseen mayor resistencia mecánica y la diferencia porcentual en precio es mínima.

El perno M8 mecanizado posee un costo unitario de 4 USD, el precio aumenta 1 USD en comparación al perno M10 puesto que, en el proceso de cilindrado el tiempo de trabajo aumenta al reducir el diámetro desde 14 hasta 8 mm. Sin embargo, al galvanizar el perno M8 el costo unitario es de 4.30 USD, generando un costo total entre pernos galvanizados y sin galvanizar de 83 USD, la diferencia en costo de los 10 pernos con recubrimiento con respecto a las 10 probetas sin recubrimiento es de 3.75 %. Dentro del mercado el perno laminado posee un valor de 0.29 ctvs, es decir que el costo total de los 20 pernos M8 entre 10 galvanizados y 10 sin galvanizar es de 8.8 USD.

Actualmente los pernos de 3/8 " - 16 UNC y 1/2 " - 13UNC existen en el mercado solamente en la presentación de rosca parcial con un valor de 0.33 y 0.57 ctvs respectivamente. Para este estudio la rosca no posee la longitud requerida, es por esta razón, que se adquirió una varilla roscada de 1/2 " x 3 m con un costo de 21.84 USD, de esta varilla se obtuvieron 20 probetas a un costo unitario por probeta de 50 ctvs y un valor unitario de recubrimiento de 30 ctvs. En el mercado actual no existe una varilla roscada de 3/8 " fabricada con un material adecuado para anclaje. Es por este motivo que el trabajo se realiza con pernos fabricados a partir de varilla corrugada

donde los pernos de 3/8 y 1/2 " poseen un costo unitario de 3 USD para su fabricación. Los pernos laminados en acero negro AISI 4140 B7 galvanizados de 1/2 " son los elementos más adecuados y confiables para estructuras metálicas debido a que poseen los más altos niveles de resistencia a la tracción y límite elástico entre los 4 tipos de probetas de 1/2 " sean los pernos prefabricados sin recubrimiento, probetas mecanizadas galvanizadas y sin galvanizar y su costo es 76 % menor que el precio de fabricación de pernos mecanizados galvanizados a partir de la varilla corrugada. Para las probetas mecanizadas de 3/8 " se recomienda utilizar en estructuras metálicas el perno sin galvanizar debido a que posee una diferencia en costo de 9 % en relación al perno galvanizado y mayor resistencia a la tracción.

4.1.2. Gastos varios

En la Tabla 27 se describe un estimado del costo generado por la utilización del laboratorio de Resistencias de materiales de la Universidad Politécnica Salesiana donde la celda de laboratorio se refiere al uso de máquina universal, asistencia del encargado del laboratorio y uso de las instalaciones. Así también, se asigna un valor aproximado en forma de gasto a los encargados de realizar los ensayos a tracción describiendo en cada caso el costo por hora y tiempo de ensayo a tracción. El costo total de horas de trabajo en un laboratorio universitario es relativamente menor comparado con laboratorios del sector privado debido a que este tipo de laboratorio emplea una menor cantidad de mano de obra.

Tabla 27. Costo de utilización de laboratorio

Descripción	Costo por hora [\$ /h]	Horas de ensayo [h]	Total [USD]
Laboratorio	10.00	23	230.00
Encargados de ensayos a tracción	7.50	23	172.50
Costo total de horas de trabajo [USD]			402.50

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

Este estudio genera gastos indirectos por cada tesista donde influye en la economía de manera negativa a la persona que habite en un sector más alejado de la Universidad. Es por este motivo que se genera la Tabla 28 donde se presenta un gasto por transporte el cual se origina según la ubicación geográfica del hogar de cada individuo con respecto al laboratorio de ensayos a tracción, existe un costo por comunicación englobando servicio de internet y llamadas telefónicas, este gasto se debe a consultorías con el tutor asignado. Además, cada tesista consume productos alimenticios al finalizar cada jornada y en ocasiones adquiere artículos de papelería.

Tabla 28. Gasto indirecto de tesistas

Descripción	Gastos de tesista 1 (USD)	Gastos de tesista 2 (USD)	Gasto Total (USD)
Transporte	7.00	2.50	9.50
Comunicación	3.00	3.00	6.00
Alimentación	12.50	12.50	25.00
Artículos de papelería	2.00	0	2.00
Gasto total individual	24.50	18.00	
Gasto indirecto global de tesistas (USD)			42.50

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

Para realizar los ensayos a tracción es necesario utilizar electricidad para la alimentación de energía en los aparatos eléctricos indispensables en experimentos de este tipo. Es por este motivo que la Tabla 29 detalla el consumo energético en las horas de trabajo empleadas en el laboratorio respecto al costo que genera cada kilovatio - hora en la máquina universal, CPU, Smart TV y luminaria. De este modo, el costo mensual para aparatos eléctricos en ensayos a tracción es de 48.47 USD lo cual representa un valor moderado y adecuado para esta clase de estudios.

Tabla 29. Costo de consumo energético

Aparatos eléctricos	Horas de consumo en ensayos (h)	Consumo energético (kW)	Consumo energético total por horas de trabajo (kWh)	Costo por 1 kWh (USD)	Costo energético total de aparatos eléctricos (USD)
Máquina universal	23	3.00	69.00	0.09	6.21
CPU	23	0.09	2.01	0.09	0.18
Smart TV	23	0.06	1.38	0.09	0.12
Focos	23	0.05	1.10	0.09	0.10
Costo global de consumo energético en ensayos a tracción (USD)					6.61

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

La Tabla 30 presenta de manera general el costo total de cada gasto realizado en el proyecto con un valor total en experimentos a tensión relativamente económico de 451.61 USD en comparación con 4300.80 USD que es el costo de ensayos a tracción de 112 probetas en un laboratorio externo privado. Por esta razón resulta favorable realizar este tipo de estudio en un laboratorio universitario debido al bajo costo de inversión en mano de obra.

Tabla 30. Costo total de proyecto

Descripción	Gasto [USD]
Materia prima y pernos laminados	69.81
Fabricación de probetas y galvanizado	310.00
Costo de utilización de laboratorio	402.50
Costo de consumo energético	6.61
Gasto indirecto de tesis	42.50
Costo total de ensayos a tracción	831.42

Elaborado por: Kevin Tapia y Cristhian Gansino

CONCLUSIONES

- En la investigación propuesta se realizó el análisis de la resistencia mecánica de pernos de anclaje hasta 1/2 " de diámetro, utilizados en estructuras metálicas. Para cumplir con la finalidad del estudio se realizaron 112 ensayos a tracción en 4 diferentes tipos de pernos de anclaje con diámetros de 8, 10 mm, 3/8 y 1/2 " obtenidas a partir de mecanizado por arranque de viruta y pernos laminados adquiridos en el mercado industrial mediante cotizaciones en diferentes establecimientos de norte y sur de Quito, además 56 pernos de anclaje entre mecanizados y sin mecanizar fueron sometidos a un proceso de galvanizado tropicalizado.
- En los pernos mecanizados de 3/8 " - 16 UNC se realizó ensayos a tracción obteniendo resultados aceptables debido a que presentan un error relativo de resistencia a la tracción de 9.77 % con respecto a los valores mostrados en catálogos industriales. El perno sin galvanizar y galvanizado poseen valores máximos de carga, resistencia a la tracción y límite elástico de 35184.60 y 32492.45 N, 496.26 y 458.40 MPa, 271.56 y 250.38 MPa respectivamente. De este modo se evidenció que la probeta de 3/8 de pulgada sin recubrimiento es el elemento con mejor resistencia a la tracción, esto se debe a una posible falla en el espesor del recubrimiento de tropicalizado.
- El perno laminado galvanizado de 1/2 " - 13 UNC al ser el elemento de mayor influencia presentó valores máximos de 82796.92 N, 674.69 y 514.26 MPa para carga, resistencia a la tracción y límite elástico respectivamente. Por este motivo se llega a la conclusión que el perno laminado galvanizado posee la mayor resistencia para estructuras metálicas, seguido por el perno laminado sin galvanizar, el perno mecanizado sin recubrimiento es el tercer elemento de mayor resistencia y el perno maquinado galvanizado es el menos resistente en su clase. Para finalizar, el perno mecanizado y laminado presentan bajos errores relativos de resistencia a la tracción de 3.80 y 1.58 % en cada caso con respecto a valores teóricos de catálogos industriales, de esta manera se demostró la confiabilidad en este tipo de ensayos.

- En los ensayos a tracción realizados en pernos M8 presentaron errores relativos de 9.93 y 9.99 % en pernos mecanizado y laminado respectivamente, demostrando la fiabilidad en este estudio. El perno laminado recubierto, el perno laminado sin galvanizar, el perno mecanizado sin galvanizar y el perno mecanizado galvanizado presentaron valores máximos en resistencia a la tracción de 722.06, 720.06, 495.36 y 486.87 MPa en cada caso. Por lo tanto, el perno M8 de mayor influencia y adecuado para estructuras metálicas es el perno laminado galvanizado debido a que sus resultados fueron los óptimos en cuanto a propiedades mecánicas de los 4 tipos de probetas M8.

- Cuatro tipos de pernos M10 fueron sometidos a varios ensayos a tracción los cuales presentaron resultados de resistencia máxima a la tracción de 730.13, 726.22, 507.74 y 507.35 MPa para las probetas laminada galvanizada, laminada sin galvanizar, mecanizada galvanizada y mecanizada sin galvanizar respectivamente. Además, los pernos mecanizados y laminados mostraron en la Tabla 23 errores relativos de 7.75 y 9.22 % lo cual demuestra que los resultados experimentales son confiables. Por lo tanto, es posible concluir que la probeta laminada galvanizada es el perno más adecuado para estructuras metálicas debido a que posee la mayor resistencia a la tracción entre los diferentes pernos experimentales M10.

- En el capítulo 3 los aceros ISO 4140 y ASTM 193 B7 fueron comparados con el acero ASTM A706, llegando a la conclusión que el acero ISO 4140 es el material con mejor calidad debido a que posee una diferencia porcentual positiva de 32.38 y 30.80 % en resistencia a la tracción para los pernos M8 y M10, mientras que el acero ASTM 193 B7 presentó un valor de 22.03 % en pernos de 1/2 ” - 13 UNC. Así también, se demostró que el acero ASTM A 706 es el material con mayor ductilidad entre los tres tipos de acero ensayados puesto que presentó deformaciones representadas en porcentaje de 53.33, 51.21 y 14.29 % en pernos M8, M10 y 1/2 ” respectivamente.

- Basados en el análisis expuesto con anterioridad los pernos galvanizados presentan una mayor resistencia. Esto se debe a que el proceso de galvanizado tropicalizado aumenta el área de sección y con ello su resistencia a la tracción. Los pernos laminados galvanizados M8, M10 y 1/2 ” presentan una diferencia positiva en costos de 0.27, 0.54 y 2.09 % a favor en comparación de las probetas sin recubrimiento.

RECOMENDACIONES

- Antes de realizar los ensayos a tracción es recomendable inspeccionar las propiedades mecánicas del material de la probeta para comparar con los parámetros iniciales que aplica el software de la máquina universal y de este modo no sobrepasar la carga máxima de la misma.
- Se recomienda aumentar el área de ajuste en el perno de 1/2 " debido a que en este caso el esfuerzo de tracción aumenta y posiblemente genere un barrido de rosca por lo cual el software arrojaría resultados erróneos en los ensayos a tracción y la mordaza de la máquina universal sufriría daños irreversibles terminando con su vida útil.
- Al fabricar las probetas mediante el proceso de mecanizado por arranque de viruta se debe procurar eliminar todo tipo de rebaba o imperfección de la superficie de los pernos roscados, de esta manera se evitará concentraciones de esfuerzos que afecten en los resultados de los ensayos a tracción.
- Verificar en el software R controller cada uno de los parámetros iniciales correspondientes al tipo de probeta a ensayar para evitar resultados erróneos debido a un procesamiento de información incorrecta.
- Para un estudio posterior se recomienda fabricar otros accesorios de sujeción diferentes a los disponibles en el laboratorio de Resistencias de Materiales de la Universidad Politécnica Salesiana - Sede Quito Sur, de esta manera la investigación abarcaría una mayor parte del mercado industrial actual al poseer una variedad más extensa de pernos de anclaje para su posterior estudio.
- Se sugiere al usuario de los pernos de anclaje utilizar los pernos laminados obtenidos a partir de empresas especializadas en su fabricación debido a que presentan una mayor resistencia a la tracción y un costo considerablemente menor que los pernos mecanizados por arranque de viruta.

REFERENCIAS

- [1] V. Yepes Piqueras, «Zonas de anclaje,» Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2019.
- [2] H. Rodríguez, «Fundamentos de los procesos de mecanizado,» Ingemecánica, Sevilla.
- [3] Galvanorte Cia.Ltda, «Galvanizado por inmersión en caliente,» Galvanorte Cia.Ltda, Quito, 2003.
- [4] Equipo Ferros Planes, «Proceso de galvanizado,» Planes, Barcelona, 2018.
- [5] V. Vallejo, «Tornillo autoperforante para fijaciones duraderas,» Sumatec, Bogotá, 2017.
- [6] La casa del perno, «Tornillo autorroscante (colepato),» La casa del perno, Quito.
- [7] AUSA, «Estricción,» Ausa Special Steel, [En línea]. Available: <https://www.ausasteel.com/glossary/estriccion/>.
- [8] E. Cama, «Aula21,» Centro de información técnica para la industria., [En línea]. Available: <https://www.cursosaula21.com/que-es-un-servomotor/#:~:text=Un%20servo%20accionamiento%20amplifica%20la,generar%20velocidad%20y%20producir%20par.&text=Del%20mismo%20modo%20C%20en%20un,fuerza%20producida%20por%20el%20motor..>
- [9] C. Angarita, P. Moewis y L. Sáenz, «Evaluación del comportamiento mecánico de un acero microaleado X-60 laminado en frío y sometido a un tratamiento térmico de recocido,» INGENIERÍA UC, vol. 10, nº 3, pp. 28-36, 2003.

- [10] J. E. Bowles, Propiedades Geofísicas de los Suelos, Bogotá: Mc Graw-Hill, 1982.
- [11] Quimica.es, «Aleación,» Quimica.es, [En línea]. Available: <https://www.quimica.es/enciclopedia/Aleaci%C3%B3n.html>.
- [12] ARQUBA, «Anclajes - Arquitectura y construcción,» ARQUBA, Argentina, 2011.
- [13] D. Cañas, «Anclajes en la mecánica de rocas con aplicación a tuneles,» Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Bogotá, 2013.
- [14] V. Valbuena, «Desempeño de pernos de anclaje post-instalados en mampostería hueca sometidos a tensión,» Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, 2017.
- [15] M. Di Gregorio, R. Papa, G. Urciuoli, L. Picarelli, L. Zeni y A. Minardo, «Performance of ground anchors built in a flysch deposit,» Science Direct, vol. 16, pp. 71-80, 2016.
- [16] V. Yepes, «Poli[Blogs],» Universitat Politècnica de València, 07 01 2016. [En línea]. Available: <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/geotecnia/page/2/>.
- [17] N. Rodríguez, «Modelación numérica de anclajes en suelos blandos,» Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Bogotá, 2004.
- [18] A. Lopez y A. Kerguelen, «Criterio de control y aceptación de anclajes activos en la práctica argentina,» SRK Consulting Latin América, pp. 770-786, 2016.
- [19] J. Gil, «Estudio Comparativo del Comportamiento Mecánico, entre los Sistemas de Apoyo Individual y tipo Pantalla, para el Reforzamiento de un Talud con Anclajes,» Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2018.

- [20] SRNAGEOMIN, SONAMI, ENAMI Y MINISTERIO DE MINERÍA DE CHILE, «Sonami,» 05 2014. [En línea]. Available: <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2016/03/7.fortificacion-acunadura.pdf>.
- [21] «Comportamiento de Anclajes Postinstalados en Concreto de Alta Resistencia, Sometidos a Carga de Tensión y Corte,» Bogotá, 2018.
- [22] A. Gutiérrez, «Anclajes en el concreto,» ALACERO, 02 03 2017. [En línea]. Available: <http://www.construccionenacero.com/comment/1951>.
- [23] Toxement, «Instalación de Anclajes adhesivos,» 2017. [En línea]. Available: http://www.toxement.com.co/media/3404/anclajes_adhesivos.pdf.
- [24] Y. M. Ruda Arias y D. F. Páez Moreno, «Anclajes Posinstalados en Concretos de Alta Resistencia,» Ciencia e Ingeniería Neogranadina, vol. 27, n° 02, pp. 137-156, 2017.
- [25] HILTI, «Sistemas de Anclaje,» 2016. [En línea]. Available: https://www.hilti.es/content/dam/documents/pdf/w2/08-Sistemas_de_anclaje_DEC.pdf.
- [26] Anclafix, «Anclajes y Tornillos,» Anclafix, 2015. [En línea]. Available: <https://www.anclafix-ec.com/anclajes-y-tornillos>.
- [27] D. Cruz, N. Vlachopoulos y B. Forbes, «The Geo-Mechanical Response of Axially Loaded Rock Bolts using Fiber Optic Technology,» XV COLOMBIAN GEOTECHNICAL CONGRESS & II INTERNATIONAL SPECIALIZED CONFERENCE OF SOFT ROCKS., Cartagena, 2016.
- [28] Concretonline, «Estabilización de taludes con autoperforantes,» 20 08 2018. [En línea]. Available: <https://www.concretonline.com/tuneles/estabilizacion-de-taludes-con-autoperforantes>.

- [29] D. Wang, D. Wu, C. Ouyang y M. Zhai, «Performance and design of post-installed large diameter anchors in concrete,» ELSEVIER, vol. 114, pp. 142-150, 2016.
- [30] R. C. Ramírez Martínez, «ANCLAJES CON BARRA ENROSCADA EN PLACAS ELABORADAS CON CONCRETOS LIVIANOS,» Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, 2020.
- [31] Walraven, «Anclajes para carga pesada,» [En línea]. Available: walraven.com/content/uploads/sites/6/2017/10/Nueva_Gama_de_Anclajes_Walraven.pdf.
- [32] Southern Fasteners and Supply, «ASTM A449,» [En línea]. Available: <https://www.southernfasteners.com/wp-content/uploads/ASTM-A449.pdf>.
- [33] Architectural wall Systems, «DESIGN OF UNC THREADED BOLTS SAE-J429/GRADE 5, OR ASTM-A449,» 19 Marzo 2014. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/doc/213341867/Grade-5-SAE-J429-Structural-Fastners>.
- [34] R. G. Budynas y J. Keith Nisbett, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, México: Mc Graw Hill, 2012.
- [35] V. M. Faires, «Cargas variables y concentraciones de esfuerzos,» de Diseño de Elementos de Máquinas, Barcelona, Montaner y Simon, S.A., 1977, pp. 130-149.
- [36] J. Zapata, Diseño de elementos de máquinas I, España: Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso, 2013.
- [37] W. Peña Rojas y J. Cortes Pineda, «Análisis de falla de pernos de acero,» Fundación Universitaria Los Libertadores, Bogotá, 2018.
- [38] A. F. Morales Galvez, «Ingeniería en Planta para el Control de Procesos Industriales en la Fabricación de Pernos, Tuercas y Afines,» Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú, 2005.

- [39] G. P. García Martínez , «Estudio para implementar mejoras en los procesos productivos en una industria metal mecánica dedicada a la elaboración de tornillos y elementos de fijación,» Universidad el Salvador, Salvador, 2016.
- [40] F. Fuentes Espinoza , «Ensayos Mecánicos en Metales,» UANL, Monterrey, 1982.
- [41] Instron, «Accesorios Línea EMIC Primera Edición,» Instron Brasil Equipamentos Científicos Ltda, Braga.
- [42] R. P. Alvarez Briceño y C. L. Peña Saltos, «Diseño y simulación de un sistema de mordazas hidraulicas para una máquina universal de ensayos marca tinius olsen modelo super ú,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2010.
- [43] SG INGENIERÍA SAS, «Anclajes en concreto,» SG INGENIERÍA SAS, Cali, 2016.
- [44] V. Roldan, G. Palazzo, N. Maldonado, A. Guzmán y F. Calderón, «Comportamiento de anclajes químicos post instalados en hormigón fisurado bajo solicitaciones de tracción,» Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras, vol. 22, nº 1, pp. 71-84, 2017.
- [45] A. Venegas, «Análisis de transferencia de fuerzas en aplicaciones de anclajes post-Instalados, para la fijación de estructuras metálicas al concreto según el Código ACI 318 – 14,» Universidad Central del Ecuador, Quito, 2018.
- [46] S. Yildiz, «Effect of hot dip galvanizing on the fatigue behavior of hot rolled and ion nitrided AISI 4340 steel,» International Journal of Fatigue, vol. 123, pp. 1-9, 2019.
- [47] Y. Rico y E. Carrasquero, «Efecto de la composición química en el comportamiento mecánico de recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente: una revisión,» Revista de Ciencia y Tecnología Ingenius, nº 18, pp. 30-39, 2017.

- [48] J. Chico, C. Díaz y P. Proaño , « Comportamiento mecánico de la capa de zinc sobre acero al varial calidad superficial y velocidad de enfriamiento,» 3C Tecnología. Investigación y pensamiento crítico, vol. 7, nº 4, pp. 50-68, 2018.
- [49] T. Gómez, J. Navarro, E. Águeda y J. García, Estructuras del vehículo, Madrid: Ediciones Paraninfo, SA, 2016.
- [50] M. El-Reedy, «Steel structures in industry,» de Onshore structural design calculations, Butterworth-Heinemann, Elsevier Science, 2017, pp. 181-254.
- [51] MIPSА, Tropicalizado, Puebla: MIPSА, 2020.
- [52] Torrod, «Recubrimiento zincado mecánico,» Torrod, Valencia, 2015.
- [53] Equipo Ferros Planes, «Proceso de zincado,» Planes, Barcelona, 2018.
- [54] Fornis centro de anclajes, «Zincado electrolítico,» Fornis , Buenos Aires, 2013.
- [55] G. Chang y D. Pérez, Guías de laboratorio de resistencia de materiales, Santa Marta: Unimagdalena, 2015.
- [56] W. Callister y D. Rethwisch, Ciencia e ingeniería de materiales, Barcelona: Editorial Reverté, 2018.
- [57] I. Biguri, «Resistencia de Materiales,» Departamento de Fabricación Mecánica del IEFPS Elorrieta-Errekamari, Vizcaya, 2020.
- [58] R. Imaz Gutiérrez, «Fundamentos experimentales de la resistemcia de materiales,» de Resistencia de materiales., Universidad de Cantabria, 2013.
- [59] «Términos para ensayos de materiales.,» INSTRON , [En línea]. Available: <https://www.instron.es/es-es/our-company/library/glossary/p/proportional-limit>.

- [60] J. Arencibi Gil, «Ensayo a tracción,» Blog de tecnología, 23 Septiembre 2015. [En línea]. Available: <http://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/fsancac/2015/09/23/elongacion/#:~:text=L%C3%ADmite%20de%20proporcionalidad%3A%20valor%20de,proporcional%20a%20la%20carga%20aplicada.&text=Es%20la%20m%C3%A1xima%20tensi%C3%B3n%20aplicable,deformaciones%20pe.>
- [61] M. J. Acevedo Monterrosa, E. Torres Montes , M. J. Zarza Ospino, R. Vargas Torres y B. Herazo Padilla, «Ensayo a tracción a probetas metalicas,» Universidad Tecnologicca de Bolivar , 2018.
- [62] R. Hibbeler, Mécanica de materiales, México: Pearson Educación, 2011.
- [63] F. Beer, E. Johnston, J. DeWolf y D. Mazurek, Mécanica de materiales, México D.F: McGrawHill, 2010.
- [64] SERVOSIS TESTING MACHINES, Máquina universal de ensayos, Madrid: SERVOSIS TESTING MACHINES, 2019.
- [65] Jinan East Testing Machine Co., Ltd, «Máquina universal de ensayos hidráulica con microcomputador,» EastGroup, China, 2002.
- [66] J. Marulanda, Materiales de construcción, Buenos Aires: El Cid Editor, 2018.
- [67] American Institute of Steel Construction, Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-05, Chicago: AISC, 2005.
- [68] ACI 355.1R-91, Informe sobre el estado del arte de los anclajes en hormigón, Detroit: American Concrete Institute, 1997.
- [69] LIBTIS, «LIBTIS,» Espárrago B7 y su fabricación – Especificaciones para el espárrago B7, [En línea]. Available: <https://libtis.com/especificaciones-para-esparrago-b7/>.

- [70] ISO, «ISO 4017,» Sujetadores - Tornillos de cabeza hexagonal - Productos de grados A y B, 01 2015. [En línea]. Available: <https://www.iso.org/standard/63206.html>.
- [71] RUIZSYSTEM, «Nomenclatura de las clases de calidad,» Grupo comercial metalúrgico, 02 10 2019. [En línea]. Available: <https://ruizsystems.es/nomenclatura-de-las-clases-de-calidad/#:~:text=En%20Tornmetal%2C%20la%20calidad%20de,el%20tornillo%20o%20la%20tuerca..>
- [72] Impopernos, «Norma ISO 4017 (DIN 933) (pernos hex milimétricos),» [En línea]. Available: <https://www.imporpernos.com/blog/Norma-iso-4017-din-933>.
- [73] Instituto Ecuatoriano de Normalización, «Varillas de acero con resaltes, laminadas en caliente, soldables microaleadas o termotratadas, para hormigon armado. Requisitos.,» INEN, Quito, 2011.
- [74] Novacero, «Ficha técnica Varilla microaleada,» [En línea]. Available: <https://www.novacero.com/catg-productos.html>.
- [75] Instituto Ecuatoriano de Normalización, Tornillería. Longitudes para tornillos. Requisitos, Quito: INEN, 2013.
- [76] A. Correa y C. M. Burgos, «Diseño e implementación de una metodología estadística para ensayos de producto terminado,» DYNA , n° 151, pp. 195-207, 2006.
- [77] D. C. Montgomery, Diseño y Analisis de Experimentos, México: Limusa Wiley, 2004.
- [78] INSTRON, «ASTM F606 Ensayos de pernos de sujeción,» INSTRON, [En línea]. Available: <https://www.instron.es/es-es/testing-solutions/by-material/metals/tension/astm-f606>.

- [79] ZwickRoell, «Ensayo de pernos, tornillos y bulones según las Normas DIN EN ISO 898-1, ASTM F606-1 y DIN EN ISO 3506-1,» Zwick/Roell, [En línea]. Available: <https://www.zwickroell.com/es-es/metales/productos-semiacabados/testing-of-screws-astm-f606-1>.

ANEXOS

Anexo A: Imágenes de ensayos a tracción en laboratorio



Figura A1. Mordazas para pernos de anclaje.



Figura A2. Máquina universal de ensayos a tracción.

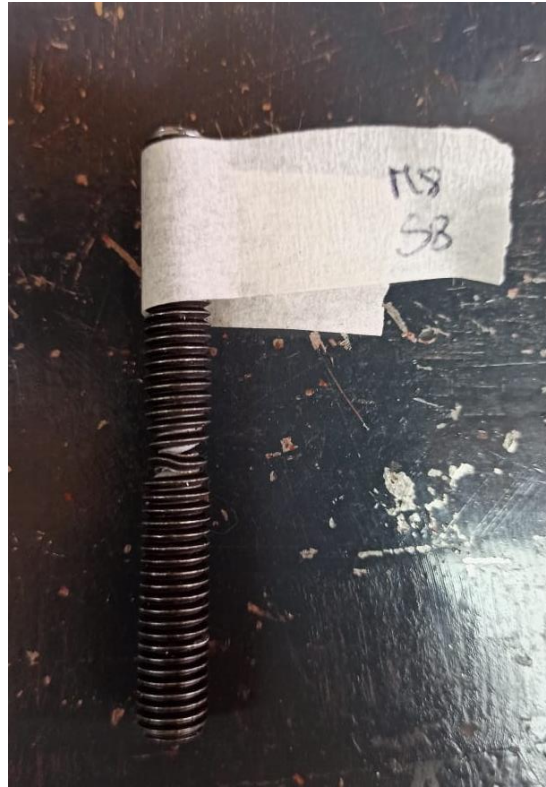


Figura A3. Prueba 8 de perno laminado M8.



Figura A4. Sistema de sujeción de máquina universal.



Figura A5. Perno M8 en sistema de sujeción antes de pretensado.



Figura A6. Perno M8 pretensado en sistema de sujeción de máquina universal.

Figura A7. Perno M8 fracturado en sistema de sujeción de máquina universal.



Figura A8. Prueba 8 de perno M8 mecanizado.



Figura A9. Perno mecanizado M8 en sistema de sujeción de máquina universal.

Figura A10. Perno mecanizado M10 fracturado en sistema de sujeción de máquina universal.



Figura A11. Prueba 8 de perno mecanizado M10.



Figura A12. Ocho pruebas de pernos sin mecanizar M10.



Figura A13. Prueba 8 de perno sin mecanizar M10.



Figura A14. Perno sin mecanizar M10 en sistema de sujeción de máquina universal.



Figura A15. Probetas laminadas M10 antes de ensayos a tracción.



Figura A16. Probetas mecanizadas M10 antes de ensayos a tracción.



Figura A17. Probetas mecanizadas de 3/8 " antes de ensayos a tracción.



Figura A18. Probetas mecanizadas M10 antes de ensayos a tracción.



Figura A19. Probetas mecanizadas M8 antes de ensayos a tracción.



Figura A20. Probetas laminadas M8 antes de ensayos a tracción.



Figura A21. Ensayos de calibración de máquina universal.



Figura A22. Probeta laminada M10 fracturada en sistema de sujeción de máquina universal.



Figura A23. Sistema de sujeción de máquina universal antes de montaje de mordaza.



Figura A24. Prueba 6 de perno mecanizado de 3/8 ”.



Figura A25. Probeta mecanizada de 3/8 " en sistema de sujeción de máquina universal.



Figura A26. Prueba 3 de perno mecanizado de 1/2 ".



Figura A27. Prueba 1 de perno sin mecanizar de 1/2 ”.



Figura A28. Probeta mecanizada de 3/8 ” fracturada en sistema de sujeción de máquina universal.



Figura A29. Montaje de mordaza de 3/8 " en sistema de sujeción de máquina universal.



Figura A30. Cilindro de sujeción y mordaza de 1/2 ".



Figura A31. Sistema de sujeción desmontado en su totalidad.

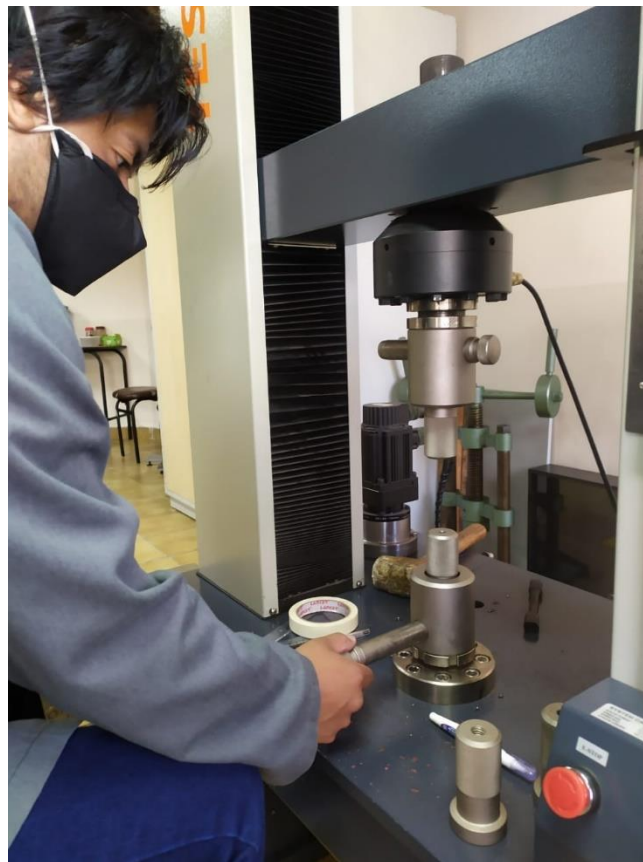


Figura A32. Sistema de sujeción montado en su totalidad.



Figura A33. Vista posterior de máquina universal TestResources.



Figura A34. Probetas sin mecanizar de 1/2 " antes de ensayos a tracción.



Figura A35. Prueba 6 de perno mecanizado galvanizado de 3/8 ”.



Figura A36. Prueba 6 errónea de perno mecanizado galvanizado de 3/8 ”.



Figura A37. Probeta mecanizada galvanizada de 3/8 " montada en sistema de sujeción.



Figura A38. Probetas sin mecanizar galvanizadas de 3/8 " antes de ensayos a tracción.



Figura A39. Prueba 3 de perno mecanizado galvanizado M8.



Figura A40. Probeta mecanizada galvanizada M10 montada en sistema de sujeción.



Figura A41. Probetas mecanizadas galvanizadas M8 antes de ensayos a tracción.



Figura A42. Probeta mecanizada galvanizada M8 montada en sistema de sujeción.



Figura A43. Prueba 4 de perno sin mecanizar galvanizado M8.



Figura A44. Probeta sin mecanizar galvanizada M8 montada en sistema de sujeción.



Figura A45. Probetas sin mecanizar galvanizadas M8 antes de ensayos a tracción.



Figura A46. Prueba 8 de perno mecanizado galvanizado M10.



Figura A47. Probeta mecanizada galvanizada M10 montada en sistema de sujeción.



Figura A48. Prueba 7 de perno sin mecanizar galvanizado M10.



Figura A49. Probetas mecanizadas galvanizadas M10 antes de ensayos a tracción.



Figura A50. Probeta sin mecanizar galvanizada M10 montada en sistema de sujeción.



Figura A51. Probetas sin mecanizar galvanizadas M10 antes de ensayos a tracción.



Figura A52. Prueba 4 de perno mecanizado de 1/2 ”.



Figura A53. Probetas mecanizadas de 1/2 " antes de ensayos a tracción.



Figura A54. Prueba 8 de perno mecanizado galvanizado de 1/2 ".



Figura A55. Probetas mecanizadas galvanizadas de 1/2 " antes de ensayos a tracción.



Figura A56. Prueba 8 de perno sin mecanizar galvanizado de 1/2 ".



Figura A57. Probeta sin mecanizar galvanizada de 1/2 " montada en sistema de sujeción.



Figura A58. Prueba 7 de perno sin mecanizar de 1/2 ".



Figura A59. Probetas mecanizadas sin galvanizar de 1/2 " antes de ensayos a tracción.



Figura A60. Probeta sin mecanizar galvanizada de 1/2 " fracturada montada en sistema de sujeción.



Figura A61. Marcas para ensayo en probeta sin mecanizar de 1/2 ”.



Figura A62. Probeta sin mecanizar de 1/2 ” montada en sistema de sujeción.

Anexo B: Resultados de ensayos a tracción

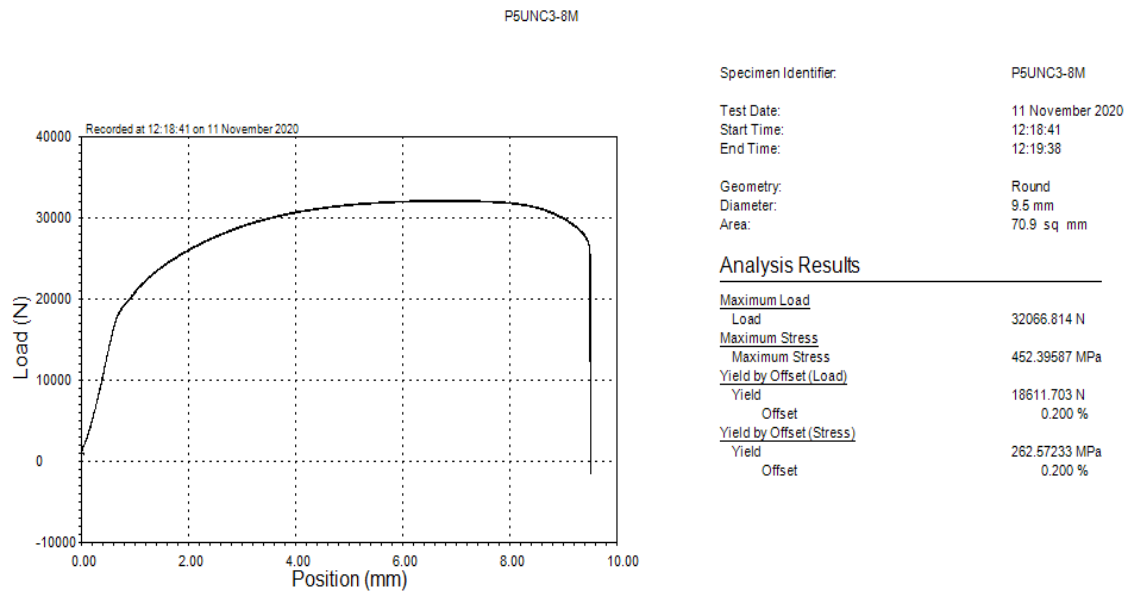


Figura B1. Prueba a tracción de perno 3/8"-16 UNC mecanizado.

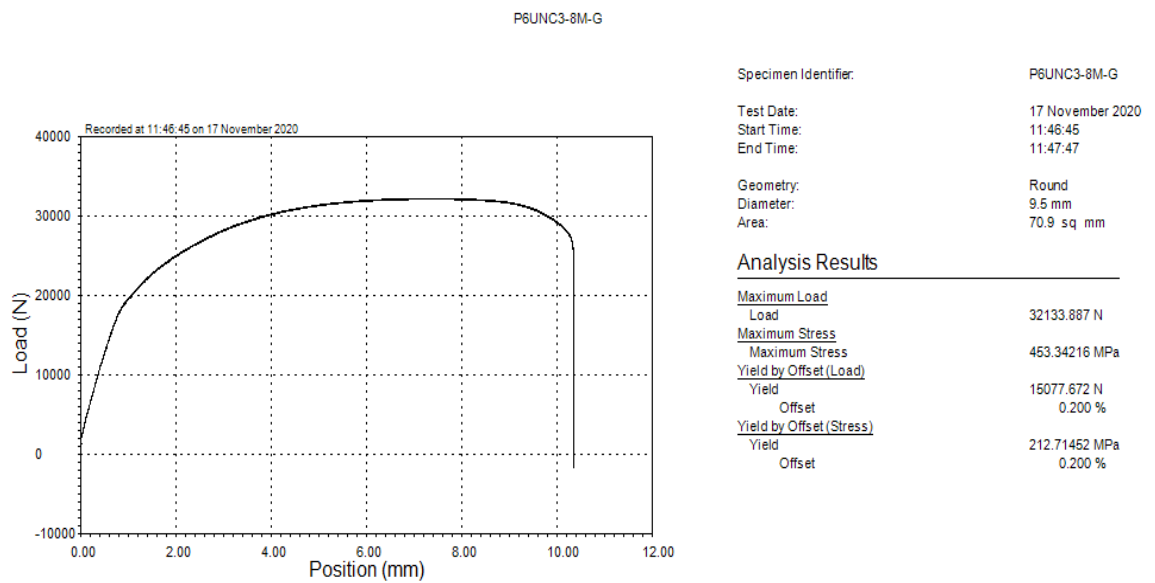
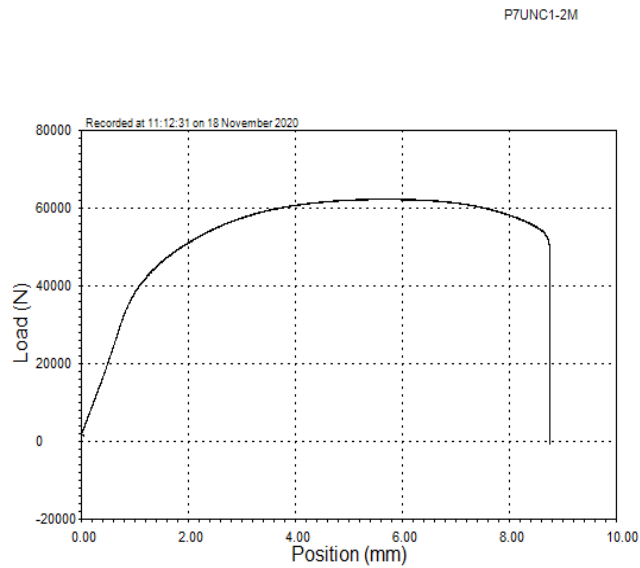


Figura B2. Prueba a tracción de perno 3/8" – 16 UNC mecanizado galvanizado.



Specimen Identifier: P7UNC1-2M

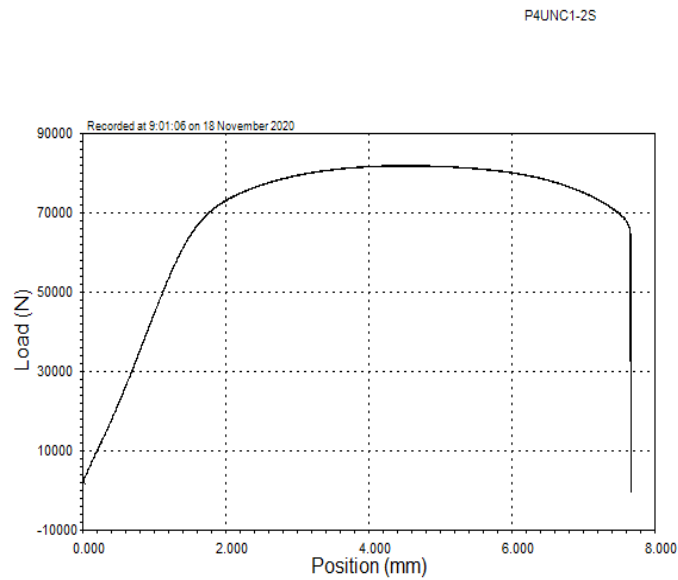
Test Date: 18 November 2020
 Start Time: 11:12:31
 End Time: 11:13:23

Geometry: Round
 Diameter: 12.5 mm
 Area: 122.7 sq mm

Analysis Results

<u>Maximum Load</u>	
Load	62144.770 N
<u>Maximum Stress</u>	
Maximum Stress	506.40115 MPa
<u>Yield by Offset (Load)</u>	
Yield	37324.012 N
Offset	0.200 %
<u>Yield by Offset (Stress)</u>	
Yield	304.14337 MPa
Offset	0.200 %

Figura B3. Prueba a tracción de perno 1/2" – 13 UNC mecanizado.



Specimen Identifier: P4UNC1-2S

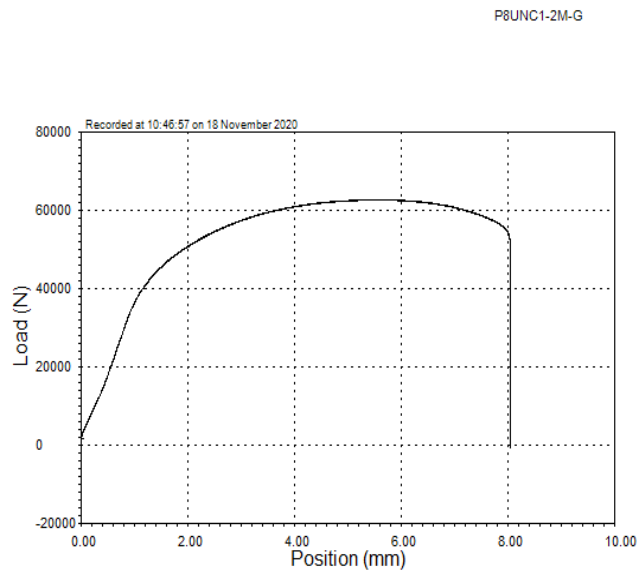
Test Date: 18 November 2020
 Start Time: 9:01:06
 End Time: 9:01:52

Geometry: Round
 Diameter: 12.5 mm
 Area: 122.7 sq mm

Analysis Results

<u>Maximum Load</u>	
Load	81754.773 N
<u>Maximum Stress</u>	
Maximum Stress	666.19788 MPa
<u>Yield by Offset (Load)</u>	
Yield	61879.074 N
Offset	0.200 %
<u>Yield by Offset (Stress)</u>	
Yield	504.23602 MPa
Offset	0.200 %

Figura B4. Prueba a tracción de perno 1/2" - 13 UNC laminado.



Specimen Identifier: P8UNC1-2M-G

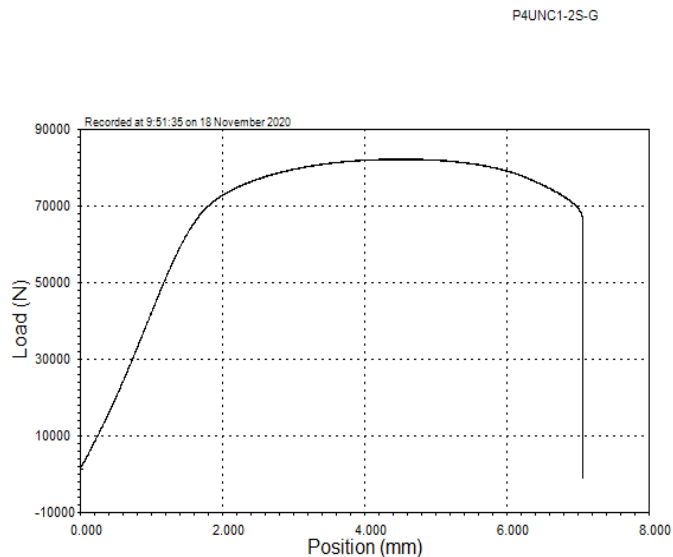
Test Date: 18 November 2020
 Start Time: 10:46:57
 End Time: 10:47:45

Geometry: Round
 Diameter: 12.5 mm
 Area: 122.7 sq mm

Analysis Results

<u>Maximum Load</u>	
Load	62526.551 N
<u>Maximum Stress</u>	
Maximum Stress	509.51218 MPa
<u>Yield by Offset (Load)</u>	
Yield	38090.145 N
Offset	0.200 %
<u>Yield by Offset (Stress)</u>	
Yield	310.38641 MPa
Offset	0.200 %

Figura B5. Prueba a tracción de perno 1/2" - 13 UNC mecanizado galvanizado.



Specimen Identifier: P4UNC1-2S-G

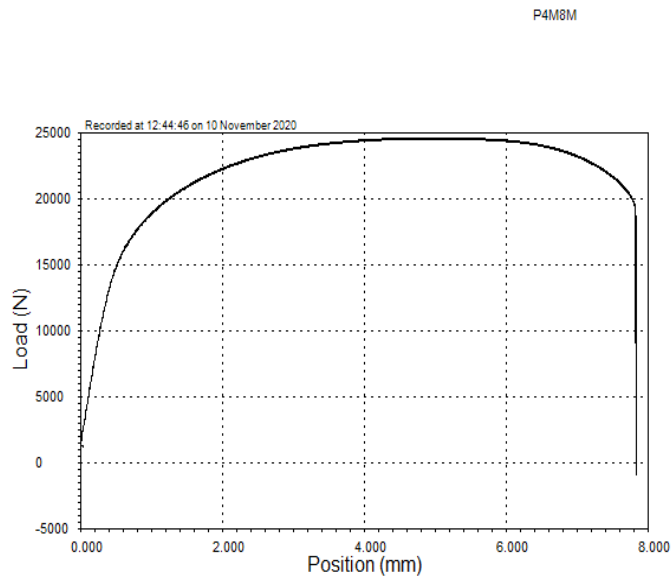
Test Date: 18 November 2020
 Start Time: 9:51:35
 End Time: 9:52:17

Geometry: Round
 Diameter: 12.5 mm
 Area: 122.7 sq mm

Analysis Results

<u>Maximum Load</u>	
Load	82092.695 N
<u>Maximum Stress</u>	
Maximum Stress	668.95142 MPa
<u>Yield by Offset (Load)</u>	
Yield	62351.137 N
Offset	0.200 %
<u>Yield by Offset (Stress)</u>	
Yield	508.08276 MPa
Offset	0.200 %

Figura B6. Prueba a tracción de perno 1/2" - 13 UNC laminado galvanizado.



Specimen Identifier: P4M8M

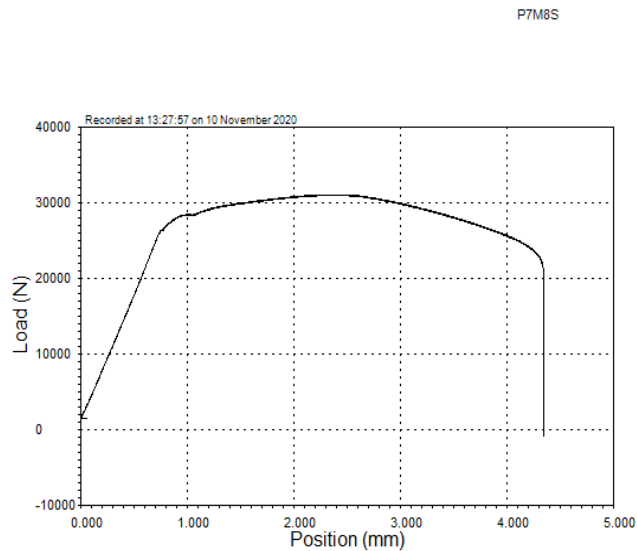
Test Date: 10 November 2020
 Start Time: 12:44:46
 End Time: 12:45:33

Geometry: Round
 Diameter: 8.0 mm
 Area: 50.3 sq mm

Analysis Results

<u>Maximum Load</u>	
Load	24583.441 N
<u>Maximum Stress</u>	
Maximum Stress	489.07193 MPa
<u>Yield by Offset (Load)</u>	
Yield	14319.274 N
Offset	0.200 %
<u>Yield by Offset (Stress)</u>	
Yield	284.87286 MPa
Offset	0.200 %

Figura B7. Prueba a tracción de perno M8 mecanizado.



Specimen Identifier: P7M8S

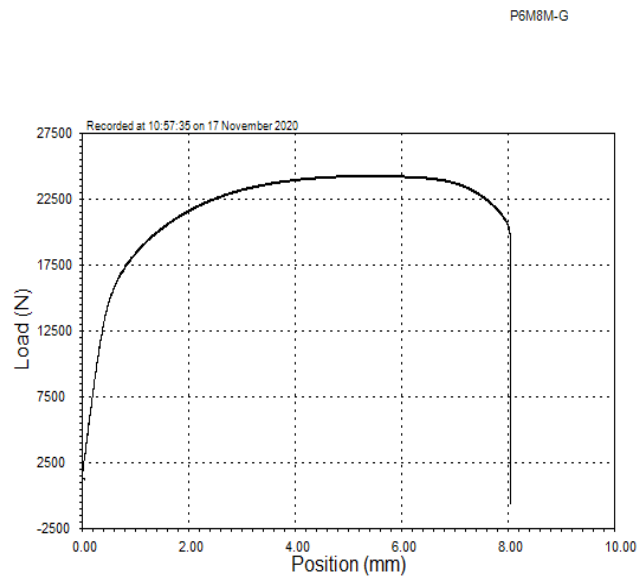
Test Date: 10 November 2020
 Start Time: 13:27:57
 End Time: 13:28:23

Geometry: Round
 Diameter: 8.0 mm
 Area: 50.3 sq mm

Analysis Results

<u>Maximum Load</u>	
Load	30996.289 N
<u>Maximum Stress</u>	
Maximum Stress	616.65149 MPa
<u>Yield by Offset (Load)</u>	
Yield	27444.201 N
Offset	0.200 %
<u>Yield by Offset (Stress)</u>	
Yield	545.98492 MPa
Offset	0.200 %

Figura B8. Prueba a tracción de perno M8 laminado.



Specimen Identifier: P6M8M-G

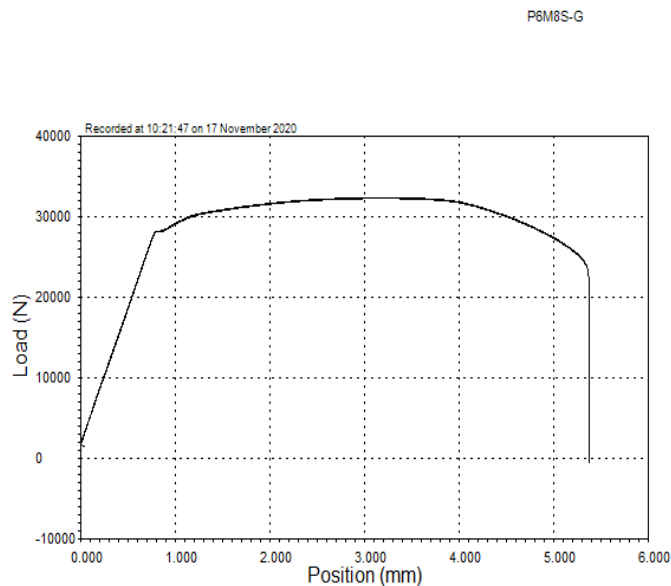
Test Date: 17 November 2020
 Start Time: 10:57:35
 End Time: 10:58:23

Geometry: Round
 Diameter: 8.0 mm
 Area: 50.3 sq mm

Analysis Results

<u>Maximum Load</u>	
Load	24260.992 N
<u>Maximum Stress</u>	
Maximum Stress	482.65701 MPa
<u>Yield by Offset (Load)</u>	
Yield	14492.106 N
Offset	0.200 %
<u>Yield by Offset (Stress)</u>	
Yield	288.31125 MPa
Offset	0.200 %

Figura B9. Prueba a tracción de perno M8 mecanizado galvanizado.



Specimen Identifier: P6M8S-G

Test Date: 17 November 2020
 Start Time: 10:21:47
 End Time: 10:22:19

Geometry: Round
 Diameter: 8.0 mm
 Area: 50.3 sq mm

Analysis Results

<u>Maximum Load</u>	
Load	32291.240 N
<u>Maximum Stress</u>	
Maximum Stress	642.41370 MPa
<u>Yield by Offset (Load)</u>	
Yield	28080.723 N
Offset	0.200 %
<u>Yield by Offset (Stress)</u>	
Yield	558.25024 MPa
Offset	0.200 %

Figura B10. Prueba a tracción de perno M8 laminado galvanizado.

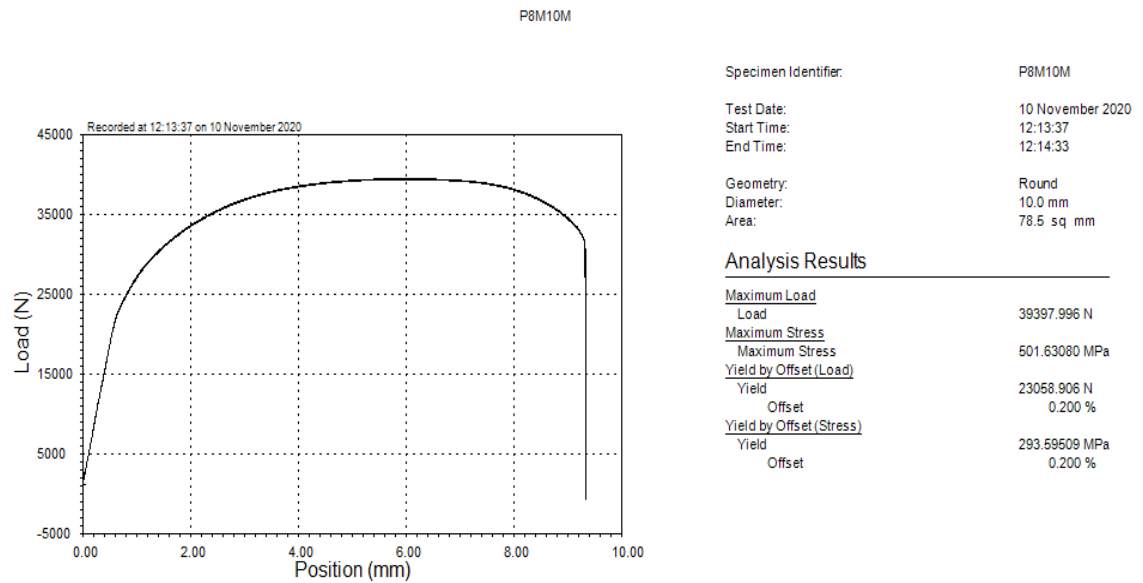


Figura B11. Prueba a tracción de perno M10 mecanizado.

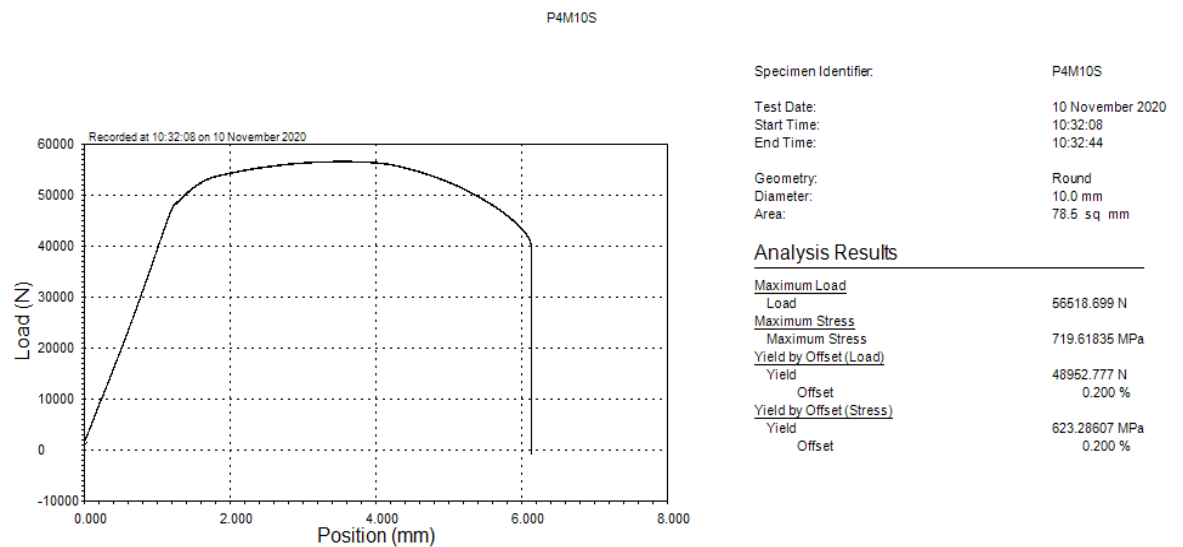
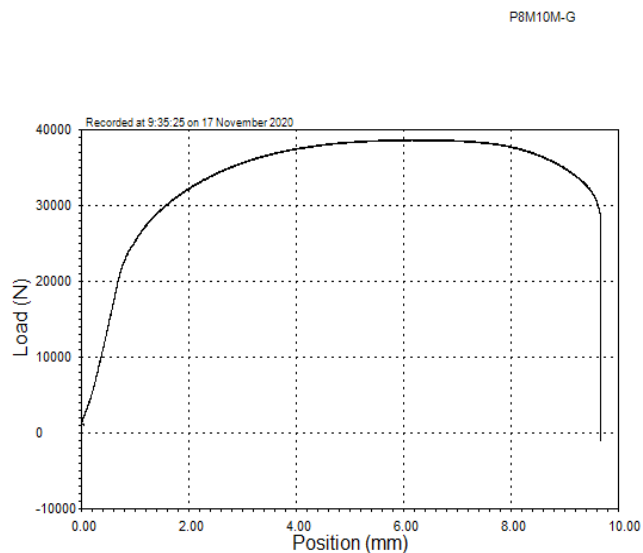


Figura B12. Prueba a tracción de perno M10 laminado.



Specimen Identifier: P8M10M-G

Test Date: 17 November 2020

Start Time: 9:35:25

End Time: 9:36:23

Geometry: Round

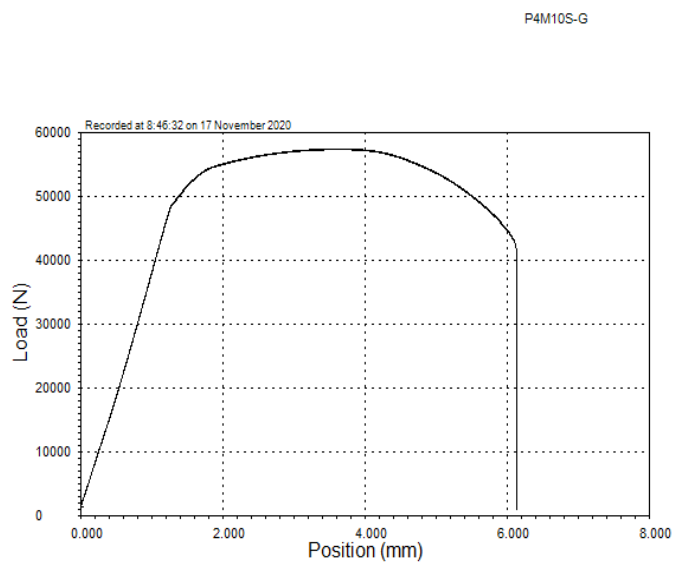
Diameter: 10.0 mm

Area: 78.5 sq mm

Analysis Results

<u>Maximum Load</u>	
Load	38600.902 N
<u>Maximum Stress</u>	
Maximum Stress	491.48193 MPa
<u>Yield by Offset (Load)</u>	
Yield	23837.941 N
Offset	0.200 %
<u>Yield by Offset (Stress)</u>	
Yield	303.51410 MPa
Offset	0.200 %

Figura B13. Prueba a tracción de perno M10 mecanizado galvanizado.



Specimen Identifier: P4M10S-G

Test Date: 17 November 2020

Start Time: 8:46:32

End Time: 8:47:08

Geometry: Round

Diameter: 10.0 mm

Area: 78.5 sq mm

Analysis Results

<u>Maximum Load</u>	
Load	57344.168 N
<u>Maximum Stress</u>	
Maximum Stress	730.12860 MPa
<u>Yield by Offset (Load)</u>	
Yield	49791.141 N
Offset	0.200 %
<u>Yield by Offset (Stress)</u>	
Yield	633.96045 MPa
Offset	0.200 %

Figura B14. Prueba a tracción de perno M10 laminado galvanizado.

Anexo C: Fichas técnicas de materia prima.

FICHA TÉCNICA

Nombre de producto:

Varilla Microaleada

Sello de calidad del producto:

INEN 2167

Normas que cumple:

INEN 2167, ASTM A706

Proceso de fabricación:

Laminado en caliente

TABLA DE EQUIVALENCIAS DE VARILLA MICROALEADA

PROPIEDADES MECÁNICAS	TRACCIÓN	PROPIEDADES		UNIDADES	VALOR
		Límite de Fluencia (Fy)	Min	MPa (kgf/cm2)	420 (4200)
			Max	MPa (kgf/cm2)	540 (5400)
		Resistencia a la Tracción (Fu)	Min	MPa (kgf/cm2)	550 (5500)
		Alargamiento mínimo en Lc=200 mm	d ≤ 20	%	14
			22 ≤ d ≤ 36		12
			d > 40		10
(Fu / Fy ≥ 1.25)		La resistencia a la tracción real debe ser igual o mayor a 1,25 veces el límite de fluencia real registrado en el ensayo de la probeta.			
SOLDABILIDAD	De acuerdo a AWS D1.4. (mediante restricciones de composición química): C.E.≤0,55% CARBONO EQUIVALENTE: C.E. = C + %Mn/6 + %Cu/40 + %Ni/20 + %Cr/10 - %Mo/50 - %V/10				
ETIQUETADO	ETIQUETADO	<ul style="list-style-type: none">• Fabricante• Grado del acero (42)• Varilla Microaleada laminada en caliente• Identificación del lote		<ul style="list-style-type: none">• Diámetro nominal de varilla• Longitud nominal de varilla• Cantidad o masa (kilogramos)• Norma NTE INEN 2167	
	MARCADO	<ul style="list-style-type: none">• Fabricante• Diámetro nominal		<ul style="list-style-type: none">• Letras AS (Acero soldable)• Letras MA (Microaleada)	

Diámetro nominal	8	10	12	14	16	18	20	22	25	28	32	mm
Área = πr^2	0.503	0.786	1.131	1.539	2.011	2.545	3.142	3.801	4.909	6.158	8.043	cm ²
Perímetro = $2 \pi r$	2.513	3.142	3.770	4.398	5.027	5.655	6.283	6.912	7.854	8.797	10.053	cm
Masa	0.395	0.617	0.888	1.208	1.578	1.998	2.466	2.984	3.853	4.843	6.313	kg/m
Masa de 1 varilla												
de 6 m	2.370	3.702	5.328	7.248	9.468	11.988	14.796	17.904	23.118	29.004	37.878	kg
de 9 m	3.555	5.553	7.992	10.872	14.202	17.982	22.194	26.856	34.677	43.506	56.817	kg
de 12 m	4.740	7.404	10.656	14.496	18.936	23.976	29.592	35.808	46.236	58.008	75.756	kg
Número de varillas en 45.36 kg (1 quintal)	19.139	12.253	8.513	6.258	4.791	3.784	3.006	2.533	1.962	1.564	1.198	de 6 m
	12.759	8.169	5.676	4.172	3.194	2.523	2.004	1.689	1.308	1.043	0.798	de 9 m
	9.570	6.126	4.257	3.129	2.395	1.892	1.533	1.267	0.981	0.782	0.599	de 12 m

VARILLA MICROALEADA

FICHA TÉCNICA - Edición No. 1 - Marzo 2017

EL ACERO DEL FUTURO
NOVACERO

Figura C1. Ficha técnica de varilla corrugada.

Propiedades Mecánicas y Físicas

Propiedad mecánica o física.		Clase de propiedad			
		8.8		10.9	12.9
		≤ M16	M16		
Resistencia a la tracción	nom.	800		1000	1200
	min.	800	830	1040	1220
Límite elástico al 0,2% a compensar la elongación no proporcional	nom.	640	640	900	1080
	min.	640	660	940	1100
Porcentaje de elongación (alargamiento) después de la fractura para una muestra mecanizada	min.	12	12	9	8
Estrés bajo Prueba de carga	nom.	580	600	830	970
Dureza Rockwell, HRC	min.	22	23	32	39
	max.	32	34	39	44
Todas las unidades se muestran como newton por milímetro cuadrado (N/mm²)					

Figura C2. Ficha técnica de acero grado 8.8.



LIDER FABRICANTE DE BIRLO B7 Y TUERCA 2H

Libtis, S.A. de C.V. Calle Abedules Lote 14, Manzana 02, C.P. 91697, Ciudad Industrial Bruno Pagliai, Tejeria, Veracruz
Oficina 2299811337 - Ventas 2294618361 C.E. cotizaciones@libtis.com www.libtis.com

Esta empresa cuenta con la especificación estandar para materiales de acero aleado B7, B7M de sujeciones para servicios de alta presión y alta temperatura.

ASTM A193/193M

ASTM A193 Grado B7 es la especificación de alta resistencia, resistencia al calor según el Instituto Americano Hierro y Acero (AISI por sus siglas en inglés) 4140 varilla roscada de acero de aleación. La varilla roscada B7 versátil es una gran demanda debido a su alta resistencia, excelente resistencia al calor y resistencia a la corrosión. B7 es ampliamente utilizado en aplicaciones comerciales de plantas y nuevos proyectos de construcción para la instalación de tuberías, maquinaria y mantenimiento

En la siguiente tabla se indican los requerimientos químicos para los grados B7, B7M que cubre la norma.

ASTM A193/193M	
Identificación	B7, B7M
Grado AISI	AISI 4140
Carbon	0.37 - 0.49
Manganeso	0.63 - 1.10
Fósforo max	0.035
Azufre max	0.04
Silicio	0.15 - 0.35
Cromo	0.75 - 1.20
Moibidano	0.15 - 0.25
Vanadio	--
Niquel	--



Diametro en Pulgadas	Centímetros	Largo	Peso x Varilla
1/4	0.6350	3.65 mts	0.91 kg
3/8	0.9525	3.65 mts	2.05 kg
1/2	1.2700	3.65 mts	3.65 kg
5/8	1.5875	3.65 mts	5.70 kg
3/4	1.9050	3.65 mts	8.21 kg
7/8	2.2225	3.65 mts	11.17 kg
1	2.5400	3.65 mts	14.60 kg
1 1/8	2.8575	3.65 mts	18.47 kg
1 1/4	3.1750	3.65 mts	22.81 kg
1 1/2	3.8100	3.65 mts	32.85 kg
1 3/4	4.4450	3.65 mts	44.71 kg
2	5.0800	3.65 mts	58.40 kg
2 1/4	5.7150	3.65 mts	73.91 kg
2 1/2	6.3500	3.65 mts	91.25 kg

La varilla B7 viene en un largo nominal de 3.65 metros de Longitud, aunque existen otros largos nominales como 5 y 6.10 metros, de acuerdo a las necesidades de fabricación.

Es una varilla de acero al carbon, la cual en el proceso de fabricación se le elabora rosca en toda la longitud de acuerdo al diametro nominal de cada varilla, se maquina los extremos y se somete a dos procesos termicos de radiofrecuencia termica especializada para proporcionar una dureza de 38.3 - 38.5 Grados Rockwell C, y el quintado en la cara con la denominación B7.

Esta varilla no es de uso final, dicha varilla tiene que cortarse a los diferentes largos requeridos a las necesidades de cada cliente, se le da el proceso de refrentado con cortadores de cobalto y tungsteno, así mismo con estos cortadores se da el proceso de chafanado.



Una vez listo del maquinado se procede al servicio de tratamiento termico y quintado en los extremos, colocación de tuerca 2H en cada extremo y es así como queda el producto final terminado.

En la siguiente tabla se indican los requerimientos mecanicos para los grados mas importantes que cubre la norma.

Grado	Res. A la tension (lb/pig2)/min	lim. Elastico (lb/pig2) min	Elongacion %	Reduccion	Dureza Max.
B7	125,000	105,00	16	50	321H o 32HRC
B7M	100,000	80,00	15	50	235HB o 22HRC

Grado B7M.- La dureza maxima para este grado es 235 HB O 99 HRM (equivalente a 22 HRC).

Figura C3. Ficha técnica de acero ASTM 193.